

ELIAS TAYLOR DURGANTE SEVERO

EFEITO DA TEMPERATURA E DA VELOCIDADE  
DO AR NA SECAGEM DE MADEIRA SERRADA  
DE ***PINUS ELLIOTTII***

Dissertação submetida a consideração da  
Comissão Examinadora como requisito par-  
cial para obtenção do Título "Mestre em  
Ciências M. Sc." no Curso de Pós-Gradua-  
ção em Engenharia Florestal do Setor de  
Ciências Agrárias da Universidade Federal  
do Paraná.

CURITIBA

1989

MINISTERIO DA EDUCACAO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANA  
SETOR DE CIENCIAS AGRARIAS  
COORDENACAO DO CURSO DE POS-GRADUACAO EM ENGENHARIA FLORESTAL

P A R E C E R

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado apresentada pelo candidato **ELIAS TAYLOR DURGANTE SEVERO**, sob o título "**EFEITO DA TEMPERATURA E DA VELOCIDADE DO AR NA SECAGEM DE MADEIRA SERRADA DE Pinus elliottii**" para obtenção do grau de Mestre em Ciências Florestais - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná. Área de concentração: **TECNOLOGIA E UTILIZACAO DE PRODUTOS FLORESTAIS**, após haver analisado o referido trabalho e arguido o candidato, são de parecer pela "**APROVACAO**" da Dissertação completando assim os requisitos necessários para receber o grau e o Diploma de Mestre em Ciências Florestais.

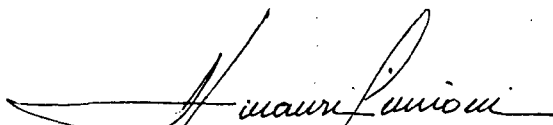
Observação:

O critério de aprovação da Dissertação e Defesa da mesma a partir de novembro de 1980 é apenas, **APROVADA** ou **NÃO APROVADA**.

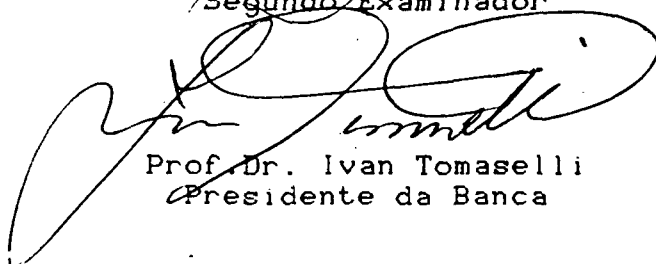
Curitiba, 09 de maio de 1989



Prof. Dr. Ivaldo Pontes Jankowsky  
Primeiro Examinador



Prof. Dr. Amauri Simioni  
Segundo Examinador



Prof. Dr. Ivan Tomaselli  
Presidente da Banca



## AGRADECIMENTO

Ao orientador Professor Dr. Ivan Tomaselli por suas sugestões, orientação, incentivo, compreensão e amizade.

Ao Professor co-orientador Dr. Amauri Simioni por suas sugestões, co-orientação, incentivo, compreensão e amizade.

Ao Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia que permitiu a realização do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal opção Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais, na Universidade Federal do Paraná.

Ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal da Universidade Federal do Paraná por possibilitar a realização deste Curso e do presente trabalho.

Aos funcionários da área de Tecnologia da Madeira pelos inestimáveis auxílios.

Aos demais Professores e colegas do Curso que direta ou indiretamente colaboraram para que este trabalho fosse realizado.

Dedico este trabalho à minha esposa e meus filhos pela compreensão, motivação e colaboração que foi sempre uma constante.

## BIOGRAFIA DO AUTOR

ELIAS TAYLOR DURGANTE SEVERO, nascido em Santa Maria, Estado do Rio Grande do Sul, em 22 de Janeiro de 1956.

Em 1982 graduou-se em Engenharia Florestal pela Universidade Federal de Santa Maria- RS.

Em Julho de 1982 ingressou no Convênio Universidade Federal de Santa Maria(UFSM) - Instituto Brasileiro do Desenvolvimento Florestal(IBDF), atuando na área de Sensoriamento Remoto.

Em Março de 1984, ingressou no Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia(INPA), como Assistente de Pesquisa, atuando na área de Secagem da Madeira.

Em 1986 iniciou o Curso de Mestrado em Engenharia Florestal do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná, área de concentração Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais, concluindo os requisitos para o Grau de M.Sc. em Dezembro de 1987.

Atualmente exerce a função de Pesquisador no Centro de Pesquisas de Produtos Florestais do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia(INPA)-AM.

## S U M A R I O

LISTA DE FIGURAS.....	vii
LISTA DE TABELAS.....	ix
RESUMO .....	xi
1 <u>INTRODUÇÃO</u> .....	01
2 <u>REVISÃO DE LITERATURA</u> .....	03
2.1    Aspectos físicos da secagem.....	03
2.1.1    Tipos de água existentes na madeira .....	03
2.1.2    Movimento de umidade acima do ponto de saturação das fibras .....	05
2.1.3    Movimento de umidade abaixo do ponto de saturação das fibras .....	08
2.2    Fatores que afetam a velocidade de secagem ..	11
2.2.1    Fatores inerentes a madeira .....	11
2.2.1.1    Estrutura anatômica .....	11
2.2.1.2    Teor de umidade .....	12
2.2.1.3    Massa específica .....	12
2.2.1.4    Espessura da madeira .....	13
2.2.2    Fatores inerentes ao ambiente .....	14
2.2.2.1    Temperatura .....	14
2.2.2.2    Umidade relativa .....	17
2.3.2.3    Velocidade do ar .....	18
2.3    Consumo de energia .....	22

3.	<u>MATERIAL E METODOS</u>	26
3.1	Coleta do material	26
3.2	Preparo do material	26
3.3	Equipamento utilizado	27
3.4	Empilhamento	29
3.5	Condições de secagem	29
3.6	Determinação do teor de umidade	32
3.7	Determinação dos tempos de secagem	32
3.8	Determinação da taxa de secagem	33
3.8	Consumo de energia	34
3.9.1	Consumo de energia em estufa piloto	34
3.9.2	Consumo teórico de energia	37
3.10	Avaliação dos defeitos de secagem	37
4	<u>RESULTADOS E DISCUSSÃO</u>	39
4.1	Considerações iniciais	39
4.2	Tempo de secagem	39
4.3	Defeitos de secagem	43
4.4	Taxa de secagem	45
4.4.1	Efeito da temperatura na taxa de secagem	47
4.4.2	Efeito da velocidade do ar na taxa de secagem	54
4.5	Consumo de energia	64
4.5.1	Consumo de energia em estufa piloto	64
4.5.2	Consumo teórico de energia	78

5.	CONCLUSOES E RECOMENDACOES.....	86
	SUMMARY .....	80
	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	92
	ANEXO 1 - PROCEDIMENTO BASICO PARA DETERMINA- ÇAO DO CONSUMO TEORICO DE ENERGIA....	97
	ANEXO 2 - ANALISES DA VARIANCIA .....	102

## LISTA DE FIGURAS

01 - Esquema simplificado do movimento da água em um capilar.....	07
02 - Influência da temperatura na taxa de secagem da madeira de <u>Pinus elliottii</u> .....	16
03 - Distribuição da velocidade do ar, em fluxo turbulento e fluxo laminar.....	19
04 - Influência da velocidade de circulação do ar na taxa de secagem da madeira de <u>Fagus Syvatica</u> verde temperatura de 65°C e 75% de umidade relativa .....	20
05 - Influência da velocidade de circulação do ar na taxa de secagem de Alborno de <u>Pinus Sylvestris</u> saturado. Secagem a 113°C. ....	21
06 - Consumo total de energia para secagem de <u>Pinus elliottii</u> em estufa de laboratório nas diversas temperaturas.....	24
07 - Esquema simplificado da estufa utilizada no presente estudo.....	28
08 - Medidores de consumo de energia acoplados ao sistema de aquecimento, vaporização e ventilação.....	36
09 - Tempos de secagem nos intervalos de umidade estudados, para os diversos tratamentos .....	42



10 - Comportamento da taxa de secagem com a temperatura no intervalo de umidade de verde até 10%.....	51
11 - Comportamento da taxa de secagem com a temperatura no intervalo de umidade de verde até 30% ....	52
12 - Comportamento da taxa de secagem com a temperatura no intervalo de 30% até 10%.....	53
13 - Influência da velocidade do ar na taxa de secagem para temperatura de 50°C.....	61
14 - Influência da velocidade do ar na taxa de secagem para temperatura de 80°C.....	62
15 - Influência da velocidade do ar na taxa de secagem para temperatura de 110°C.....	63
16 - Comparação entre consumo teórico e consumo obtido em estufa piloto.....	85

## LISTA DE TABELAS

01 - Programas utilizados para secagem de <u>Pinus elliottii</u> .....	31
02 - Tempos de secagem nos intervalos de umidade estudados, para os diversos tratamentos.....	41
03 - Taxa de secagem nos intervalos de umidade de verde até 10%, verde até 30% e 30% até 10% para <u>Pinus elliottii</u> .....	46
04 - Taxa de secagem média para variação da temperatura dentro das velocidades do ar.....	48
05 - Taxa de secagem média para variação da velocidade do ar dentro das temperaturas .....	56
06 - Taxa de secagem - comparação de médias através do teste de Duncan- intervalo de umidade de verde até 10% .....	57
07 - Taxa de secagem - comparação de médias através do teste de Duncan- intervalo de umidade de verde até 30% .....	58
08 - Taxa de secagem - comparação de médias através do Duncan- intervalo de umidade de 30% até 10% .....	59
09 - Consumo de energia em kWh para o sistema de aquecimento, sistema de vaporização e sistema de ventilação.....	65

10 - Consumo de energia - comparação de médias através do teste de Duncan- intervalo de umidade de verde até 10% .....	66
11 - Consumo de energia - comparação de médias através do teste de Duncan - intervalo de umidade de verde até 30% .....	67
12 - Consumo de energia - comparação de médias através do teste de Duncan- intervalo de umidade de 30% até 10% .....	68
13 - Consumo médio de energia para as temperaturas e porcentagem de consumo.....	72
14 - Consumo de energia por hora de operação e por quilograma de água evaporada no intervalo de umidade de verde até 10% .....	75
15 - Consumo de energia por hora de operação e por quilograma de água evaporada no intervalo de umidade de verde até 30% .....	76
16 - Consumo de energia por hora de operação e por quilograma de água evaporada no intervalo de umidade de 30% até 10% .....	77
17 - Consumo teórico de energia no intervalo de umidade de verde até 10% (kWh).....	80
18 - Consumo teórico de energia no intervalo de umidade de verde até 30% (kWh) .....	81
19 - Consumo teórico de energia no intervalo de umidade de 30% até 10%(kWh).....	82

20 - Relação entre consumo teórico e consumo obtido em estufa piloto .....	84
---	----

## RESUMO

Corpos de prova de Pinus elliottii com dimensões de 800mm de comprimento, 25mm de espessura e largura variável, foram submetidas à secagem em estufa piloto nas temperaturas de 50°C, 80°C e 110°C, usando três velocidades de circulação do ar para cada temperatura. Manteve-se em todos os tratamentos a mesma umidade relativa e volume de madeira.

O aumento da temperatura elevou significativamente a taxa de secagem. No âmbito da temperatura de 80°C, o emprego de alta velocidade do ar como 8,5 m/s, trouxeram resultados significativos durante a fase inicial da secagem, enquanto que no âmbito da temperatura de 110°C, qualquer aumento da velocidade do ar foi significativo nesta fase da secagem.

O emprego das temperaturas de 80°C e 110°C, fez surgir na madeira mancha marrom, alguns casos de encanoamentos e empenamentos, além de um escurecimento superficial que demonstrou intensificar-se com o aumento da velocidade do ar nestas temperaturas. No entanto, convém salientar que a não ser pela presença de mancha marrom, os demais defeitos foram removidos com o aplainamento de aproximadamente 1mm. Para

remoção da mancha marrom foi necessário remover de 2 mm a 4 mm de uma das faces da madeira.

O consumo de energia obtido com a secagem à alta temperatura (110°C), demonstrou ser cerca de 30% menor que o consumo obtido com a secagem convencional (50°C e 80°C).

O consumo de energia calculado teóricamente, representou em média 80% do consumo obtido em estufa piloto. Estes resultados são considerados satisfatórios quando comparados com estudos semelhantes desenvolvidos por outros pesquisadores.

## 1. INTRODUÇÃO

A secagem é uma fase importante na indústria de transformação da madeira. A madeira seca é mais resistente, mais leve e estável, recebe com maior facilidade acabamentos superficiais, pode ser colada sem problemas e é menos susceptível a agentes degradadores.

A taxa ou velocidade de secagem depende tanto dos fatores inerentes ao processo de secagem, ( temperatura, umidade relativa e velocidade do ar) como também dos fatores intrínsecos à madeira. A partir de 1966, quando o Pinus spp foi introduzido no sul do Brasil, com objetivo de suprir a necessidade da indústria de papel e celulose e de substituir o uso da Araucária na indústria de transformação primária da madeira, inúmeros estudos sobre o comportamento de secagem desta espécie vem sendo realizados. Estudos conduzidos por TOMASELLI<sup>42</sup> e SANTINI<sup>31</sup> demonstram que o aumento da temperatura reduz consideravelmente o tempo de secagem, teor de umidade de equilíbrio e consumo de energia.

O efeito da velocidade do ar na secagem de Pinus elliotii foi pouco estudado até o momento, no entanto, sabe-se que exerce considerável influência na transferência de calor à superfície da madeira, e na transferência da massa de vapor d'água da superfície para o meio secante.

Neste estudo, a madeira de Pinus elliotii foi submetida à secagem nas temperaturas de 50°C, 80°C e 110°C, usando velocidades do ar de 2,5m/s, 5,5m/s e 8,5m/s para cada temperatura.

O presente estudo tem como objetivo:

1. Avaliar o efeito da temperatura de secagem e da velocidade do ar no tempo de secagem, qualidade do material, taxa de secagem e consumo de energia.
2. Comparar o cálculo teórico do consumo de energia com o consumo efetivo, obtido em estufa piloto.



## **2. REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1. Aspectos físicos da secagem**

#### **2.1.1. Tipos de água existentes na madeira**

O teor de umidade inicial de uma árvore pode variar muito, algumas espécies possuem 30%, outras atingem 200% ou mais de umidade em relação a seu peso seco (RASMUSSEN<sup>30</sup>, PONCE e WATAI<sup>27</sup>). Após a derrubada da árvore, a madeira começa a perder umidade para o meio ambiente, esta umidade comumente chamada de "seiva", embora contenha alguns materiais insolúveis do ponto de vista de secagem, é considerado como água pura.

Esta água presente na madeira é classificada da seguinte maneira (BRAMHALL e WELLWOOD<sup>1</sup>; SIMPSON<sup>35</sup>):

- a) Como água capilar presente nos lúmens celulares, espaços intercelulares e aberturas de pontuações. Na realidade, esta água não é completamente livre pois existem forças capilares atuando sobre a mesma;
- b) Como vapor d'água depositado nos lúmens celulares e nos espaços não ocupados pela água livre;
- c) Como água higroscópica adsorvida pelas paredes celulares, principalmente pela celulose e hemicelulose que constituem a maior parte da substância madeira. Esta inclui dois tipos de água distinguíveis em função das forças que as mantêm presas

a substância madeira.

Na secagem, a água capilar é a primeira a ser removida da madeira, pois as forças que mantêm esta água presa nos lúmens celulares são consideravelmente menores que as forças que mantêm a água na parede celular (SKAAR<sup>38</sup>). A retirada desta água não afeta em nada as propriedades da madeira, a não ser uma considerável perda de peso. O ponto em que os lúmens celulares não mais contém água capilar e que as paredes celulares encontram-se saturadas de água de impregnação, é conhecido como ponto de saturação das fibras (PSF). Este ponto, situa-se segundo SKAAR<sup>38</sup> entre 25% e 35% de umidade em relação ao peso seco do material, variando com a espécie, teor de extrativos, temperatura, etc. Em termos práticos, considera-se como sendo de 30% para todas as espécies (BRAMHALL e WELLWOOD<sup>1</sup>, RASMUSSEN<sup>28</sup>).

O PSF é de grande importância, devido as mudanças que ocorrem na madeira a partir deste ponto: alterações na resistência mecânica, nas propriedades físicas e contrações. Estas alterações são decorrentes da retirada da água presente nos espaços submicroscópicos da parede celular, fazendo com que as micelas se aproximem umas das outras conferindo-lhes maior rigidez.

### 2.1.2. Movimento de unidade acima do ponto de saturação das fibras

Acima do PSF, o movimento de unidade do interior para a superfície da madeira é causado por forças capilares, e segue as leis de Poiseuille (SIAU<sup>34</sup>, HART<sup>15</sup>). KOLLMANN e COTE<sup>23</sup>, descrevem este tipo de movimento de uma maneira simplificada. Em um capilar cheio com um determinado líquido, o movimento de água é produzido pelas diferenças existentes em tensão, devido as forças existentes na superfície do menisco dentro do capilar. A força de tensão "T" em um menisco balanceado de um capilar com raio "r", pode ser calculado utilizando-se a equação (1), sem levar em consideração as diferenças de pressão do ar existente dentro do tubo capilar.

$$T = H \cdot d = \frac{2 t}{d \cdot r} \cdot d = \frac{2 t}{r} \dots\dots\dots(1)$$

onde:

H = altura que o líquido sobe no capilar

d = densidade do líquido (g/cm<sup>3</sup>)

t = tensão superficial do líquido (g/cm)

Na figura 1, pode-se observar um menisco balanceado e outro não balanceado. A pressão do vapor sobre o menisco balanceado (menisco mais côncavo) é menor que a pressão de

vapor sobre o menisco não balanceado (menisco mais plano), existindo portanto o movimento de água capilar na direção do menisco mais côncavo em função do gradiente de pressão criado pela evaporação na superfície superior e condensação na inferior.

Segundo STAMM<sup>38</sup>, o movimento capilar é favorecido pelo aumento da temperatura, pela existência de bolhas de ar no interior das células e pelo aumento do diâmetro das pontuações. HART<sup>15</sup> cita que a presença de bolhas de ar dentro das cavidades celulares, devido a pressão do ar mais pressão do vapor d'água produzidos pelo aquecimento, fazem com que a água movimente-se através das pontuações para as células adjacentes. No entanto se o diâmetro das bolhas de ar forem menores que o raio do menisco do maior capilar do sistema, pode provocar uma redução significativa no movimento capilar, pois quando uma dessas bolhas d'água for forçada a passar por uma pontuação, a interface ar-água desta bolha é obrigada a deformar-se tomando uma nova forma esférica e, teóricamente o raio do menisco fica igual ao raio da pontuação. Portanto, existe um aumento significativo na tensão capilar e conseqüentemente uma pressão muito maior deve ser exercida para que o movimento do líquido se processe. (SIAU<sup>34</sup>)

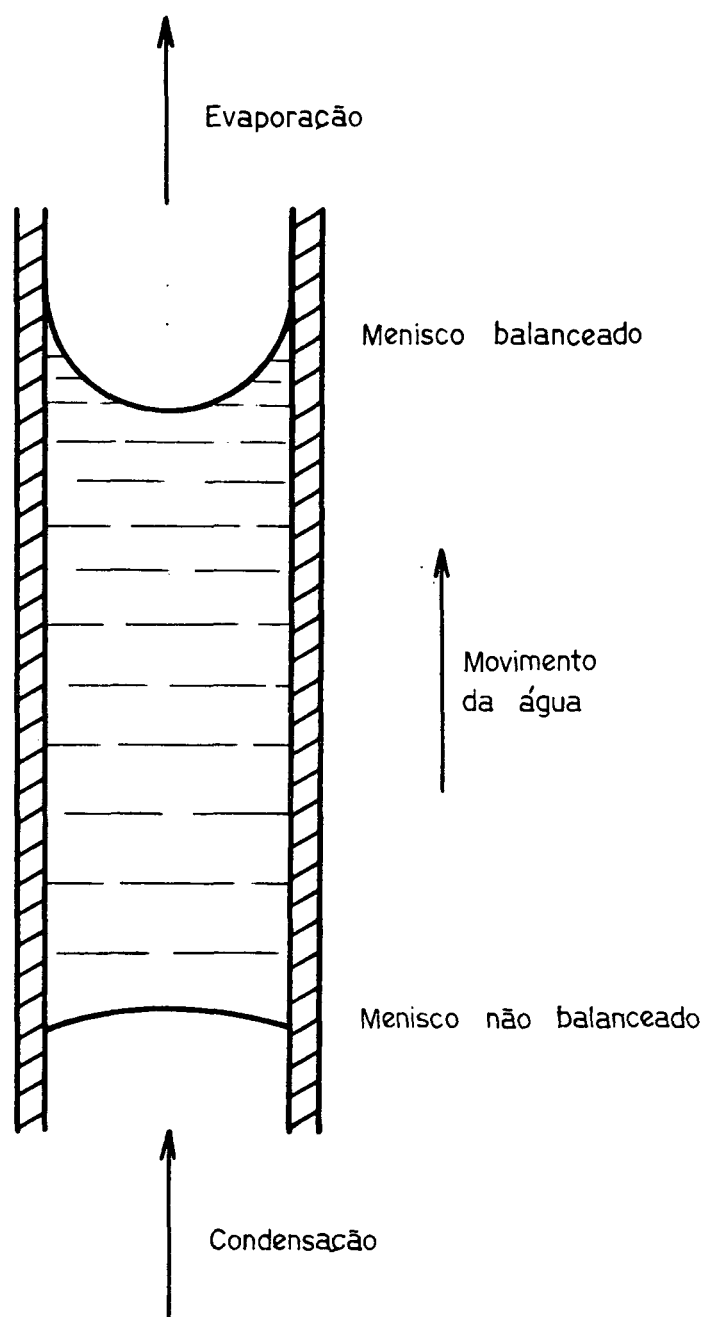


Figura 1 - Esquema simplificado do movimento de água em um capilar (adaptado de KOLLMANN e COTE, 1968).

### 2.1.3. Movimento de unidade abaixo do ponto de saturação das fibras

Abaixo do PSF o movimento da unidade através da madeira é considerado um fenômeno de difusão. A água de impregnação move-se através das paredes celulares por um gradiente de umidade, evapora e atravessa as cavidades celulares por um gradiente de pressão de vapor, torna a condensar para atravessar as paredes celulares, e assim sucessivamente até atingir a superfície da madeira (BRAMHAL e WELLWOOD<sup>1</sup>, STAMM<sup>30</sup>, HART<sup>15</sup>).

Esta passagem de água de impregnação através das paredes celulares deve-se ao "pulo molecular ao acaso" onde as moléculas pularam de um local de adsorção para outro apenas quando a força atraente e o trabalho de abrir a estrutura da madeira forem maiores que as forças atraentes do local de origem. Logicamente as moléculas adsorvidas na segunda camada ou em camadas moleculares subsequentes terão mais facilidade de se mudar do que as moléculas da primeira camada. O pulo molecular torna-se positivo e direcional sómente com o estabelecimento de um gradiente de umidade dentro do material. Já o movimento do vapor d'água através das cavidades celulares, câmaras de pontuação, aberturas da membrana de pontuação e espaços intercelulares é estabelecido quando grande parte das forças capilares

cessam, ficando nas cavidades celulares apenas ar e vapor d'água, estabelecendo-se assim um gradiente de pressão de vapor resultante das diferenças de umidade relativa do ar confinado nestes espaços e do ar que envolve a madeira. Logo, se uma área de alta concentração de moléculas de vapor d'água (interior da madeira) e outra de baixa concentração (mais superficial) entrarem em contato, a área de mais concentração cederá vapor d'água para a de menos concentração. (STAMM<sup>38</sup>)

Caso o fluxo e o gradiente de concentração de umidade sejam constantes no espaço e no tempo, a quantidade de umidade removida da madeira pode ser determinada pela primeira lei de Fick, que é expressa por:

$$K_d = \frac{m \cdot L}{t \cdot A \cdot M} \dots\dots\dots(2)$$

onde:

$K_d$  = coeficiente de condutividade para difusão do vapor de água através da madeira (g/cm<sup>2</sup>seg)

$m$  = massa do vapor transportado através do corpo de prova (g)

$L$  = comprimento do corpo de prova na direção do fluxo (s)

$A$  = área transversal do corpo de prova perpendicular a direção do fluxo (cm<sup>2</sup>)

M = diferença de umidade entre as superfícies paralelas separadas pela distância L, expressa em porcentagem.

Como o fluxo e o gradiente são variáveis no tempo e no espaço, quando seca-se a madeira, a equação anterior não pode ser utilizada, e a segunda lei de Fick expressa melhor o fluxo por difusão.

$$\frac{dm}{dt} = Dg \frac{d^2 M}{dx^2} \dots\dots\dots(3)$$

onde:

$dm/dt$  = quantidade de umidade removida (m) na unidade de tempo (t)

$Dg$  = coeficiente de difusão médio ( $cm^2/s$ )

$\frac{d^2 M}{dx^2}$  = variação da umidade na distância (x)



## **2.2. Fatores que afetam a velocidade de secagem**

### **2.2.1. Fatores inerentes a madeira**

#### **2.2.1.1. Estrutura anatômica**

A água movimenta-se na madeira no sentido longitudinal, tangencial e radial. Segundo COMSTOCK<sup>7</sup>, COMSTOCK e COTE<sup>8</sup>, STAMM<sup>38</sup> o fluxo de água capilar no sentido das fibras é pelo menos 50 vezes maior que perpendicular as mesmas. Nas coníferas este fato deve-se em parte a presença de canais resiníferos que possuem diâmetros maiores que os demais elementos, enquanto que nas folhosas deve-se principalmente as placas de perfuração dos vasos que da mesma forma apresentam facilidade para o movimento de umidade. SIAU<sup>34</sup> considera ainda que nas coníferas o fluxo na direção tangencial é maior que na direção radial, uma vez que as pontuações das faces tangenciais são geralmente em pequena quantidade e de pequeno tamanho, enquanto a maioria das pontuações inter-traqueóides encontram-se nas faces radiais.

Abaixo do PSF, a velocidade de difusão no sentido longitudinal é cerca de 10 a 15 vezes maior que na transversal, enquanto a difusão radial é de 20% a 50% maior que a tangencial. Para KOLLMANN e COTE<sup>23</sup>, este fato deve-se aos raios lenhosos, e afirma que em folhosas com

grande proporção de células radiais, a difusão neste sentido pode ser até mais que o dobro da tangencial.

#### 2.2.1.2. Teor de umidade

De uma maneira geral, quanto maior a diferença entre teor de umidade inicial e teor de umidade final, maior é o tempo necessário para secagem da madeira.(KOLLMANN e COTE<sup>23</sup>). Para HART<sup>15</sup>, o tempo de secagem aumenta com o teor de umidade inicial em madeiras altamente permeáveis, onde ocorre fluxo de massa e a remoção de umidade superficial é o fator limitante, como em madeiras altamente impermeáveis onde o fator limitante é a difusão. No entanto, KOCH<sup>20</sup> comenta que para madeiras moderadamente permeáveis que apresentam gradiente de umidade parabólica durante todo o período de secagem, o tempo total requerido para secagem pode ser independente do teor de umidade inicial.

#### 2.2.1.3. Massa específica

Pode-se dizer que, de um modo geral, em madeiras de baixa massa específica a secagem irá ocorrer mais rapidamente que em madeiras de alta massa específica. Isto porque diminuindo a massa específica, estar-se-á também reduzindo o volume de paredes celulares por onde a água

move-se lentamente, e aumentando o volume de espaços vazios por onde o vapor d'água move-se rapidamente (BROWN, PANSIN e FORSAITH<sup>3</sup>). Para HART<sup>15</sup> o tempo necessário para remoção da água superficial é diretamente proporcional a massa específica, enquanto que no caso da difusão da umidade do interior para a superfície, é proporcional à raiz quadrada do mesmo.

Entretanto KOCH<sup>20</sup>, HART<sup>15</sup> comentam que para temperaturas acima do ponto de ebulição da água, o tempo de secagem independe da massa específica, pois se para uma maior massa específica uma maior quantidade de água deve ser removida para uma dada redução do teor de umidade, por outro lado, o movimento do calor ocorre muito mais facilmente através das paredes celulares, do que através das cavidades celulares.

#### 2.2.1.4. Espessura da madeira

Segundo KOLLMANN<sup>22</sup>, a velocidade de difusão é proporcional ao gradiente de umidade e ao gradiente de pressão parcial do vapor, e como estes são inversamente proporcional a espessura da madeira, a velocidade de difusão também o é. Segundo HILDEBRAND<sup>18</sup>, para uma mesma espécie, com duas diferentes espessuras, sob a mesma condição de secagem, o tempo de secagem pode ser calculado pela equação(4).

$$T_2 = T_1 \frac{C_2^{1,25*}}{C_1} \dots\dots\dots(4)$$

onde:

$T_2$  = tempo estimado para secar a tábua de espessura  
2(h)

$T_1$  = tempo gasto para secar a tábua de espessura 1(h)

$C_2$  = espessura da tábua 2 (mm)

$C_1$  = espessura da tábua 1 (mm)

\* Há divergência com relação ao expoente 1,25, alguns autores sugerem de 1,5 a 1,7.

## 2.2.2. Fatores inerentes ao ambiente

### 2.2.2.1. Temperatura

De uma maneira geral, quanto maior a temperatura maior a velocidade de secagem, pois o calor é a fonte da qual as moléculas d'água da madeira adquirem a energia cinética necessária para provocar a evaporação, a qual depende tanto da quantidade de energia fornecida por unidade de tempo, como da capacidade do ar de absorver umidade (CECH e PFAFF<sup>4</sup>). No entanto deve-se observar certos limites de

temperatura para que não ocorra a degradação térmica da madeira.

Estudos conduzidos por SANTINI<sup>31</sup>, com madeira de Pinus elliottii em estufa de laboratório sem circulação de ar e controle de umidade relativa, demonstraram que a taxa de secagem no intervalo de umidade de verde até 10% aumenta linearmente com a temperatura. Segundo o mesmo autor, um aumento de temperatura de 60°C para 180°C faz com que a taxa de secagem aumente cerca de 10 vezes. A figura 2 mostra a correlação existente entre temperatura e taxa de secagem obtida no estudo. Estudo semelhante conduzido por TOMASELLI<sup>42</sup>, porém com metodologia direcionada para determinação dos estágios de secagem, obteve aumentos significativos na taxa de secagem com o aumento da temperatura. Comenta o autor, que no primeiro estágio a taxa de secagem a 180°C foi cerca de 5 vezes superior à obtidos a 80°C. Neste estágio foi observado que a taxa de secagem não aumenta linearmente com a temperatura, como constatado inicialmente por HANN<sup>11</sup>. Para TOMASELLI este fato pode ser explicado em função da diferença de metodologia empregado no estudo de HANN, onde, além de outros aspectos, a transferência de calor era feita principalmente por condução, enquanto que no

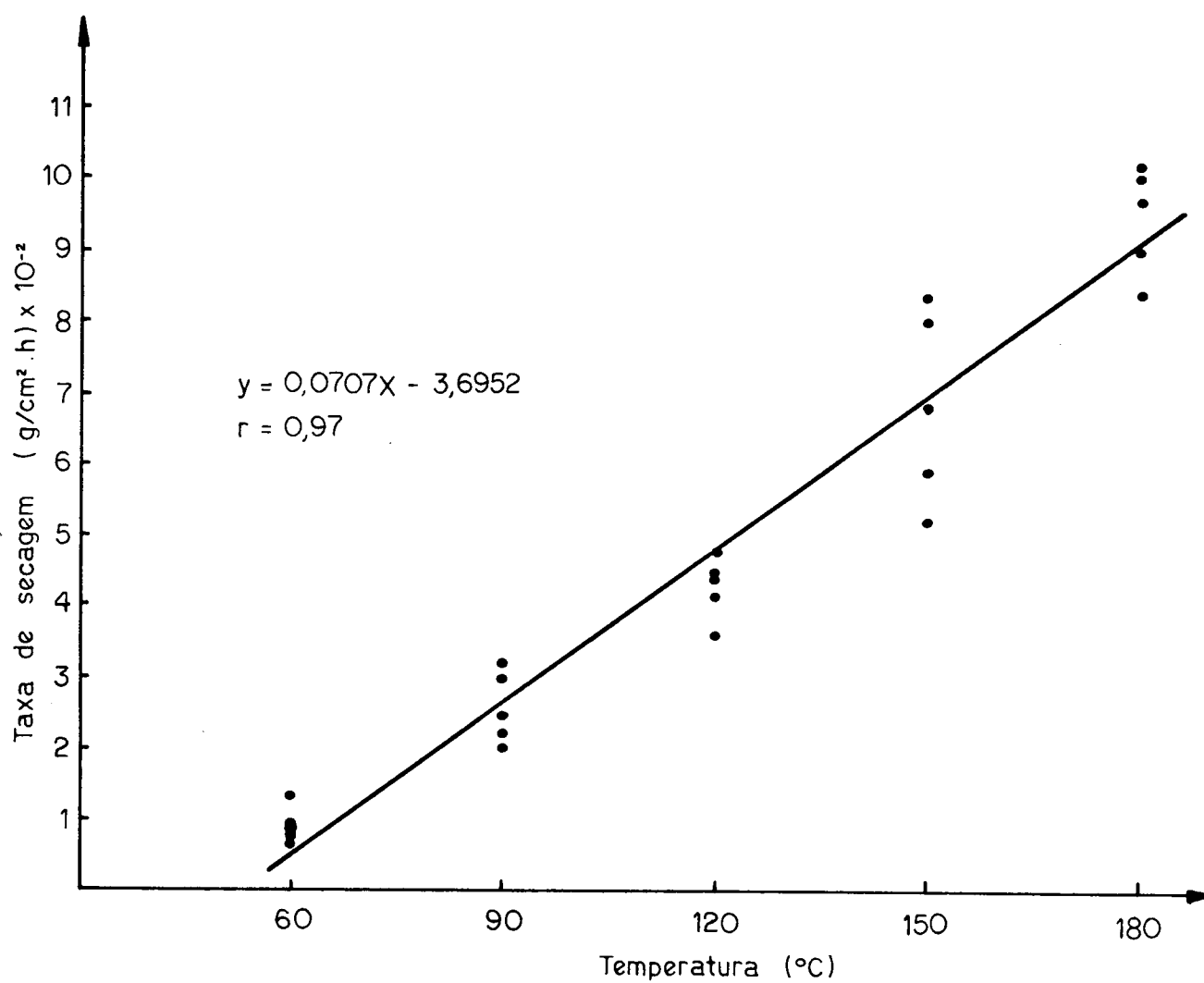


Figura 2 - Influência da temperatura na taxa de secagem de madeira de *Pinus elliottii* (  $r$  = coef. correlação,  $y$  = eq. regressão ).

seu estudo a transferência de calor foi realizada principalmente por radiação, cuja emissividade varia com a quarta potência da temperatura.

#### 2.2.2.2. Umidade relativa

A umidade relativa do ar é a relação existente entre o total de vapor d'água presente no ar e a quantidade máxima de vapor que o ar poderia absorver a uma mesma temperatura e pressão (HILDEBRAND<sup>17</sup>, BRAMHAL e WELLWOOD<sup>1</sup>, GALVAO e JANKOWSKY<sup>10</sup>). Portanto, a velocidade na qual se efetua a evaporação da água na superfície de uma peça de madeira é em grande parte função da umidade relativa do ar que está em contato com a madeira. Se o ar tem quase tanta umidade quanto a que possa reter, este poderá absorver mais umidade, porém de forma relativamente lenta e a secagem se realizará lentamente, porém se ao contrário o ar tiver uma pequena porcentagem de umidade este absorverá umidade adicional mais rapidamente e a secagem em tal ambiente será realizada em menor tempo (BROWN e BETHEL<sup>2</sup>). Com o aumento da temperatura de secagem sem adicionar umidade, a umidade relativa do ar diminui porque aumenta a capacidade do ar em reter umidade. Para manter a umidade relativa do ar constante durante o processo de secagem, é necessário que haja troca de ar úmido por ar fresco. (HILDEBRAND<sup>17</sup>)

### 2.2.2.3. Velocidade do ar

A influência da velocidade do ar na taxa de secagem foi estudada por vários autores (HART<sup>14</sup>, KOLLMANN e SCHNEIDER<sup>24</sup>, CECIL e PFAFF<sup>4</sup>, TAYLOR e MITCHELL<sup>38</sup>). O fluxo do ar no processo de secagem exerce duas funções básicas: transferência de calor para a superfície da madeira e transferência de massa de vapor d'água da superfície para o ar secante. Segundo TOMASELLI<sup>40</sup>, TORGESON<sup>47-48</sup>, para obter-se uma melhora no processo de secagem é necessário quebrar a estratificação da camada limite formada em regiões próximas a superfície onde o fluxo laminar de ar atua como uma camada isolante retardando a evaporação e transferência de calor. A camada limite do fluido turbulento corresponde a uma baixa resistência térmica e alto coeficiente de transferência de calor. A distribuição do fluxo laminar e fluxo turbulento entre duas superfícies é mostrado pela figura 3.

KOLLMANN e SCHNEIDER<sup>24</sup>, consideram que a influência da velocidade do ar sobre a taxa de secagem é mais significativa a alta temperatura do que em processos convencionais, pois na secagem convencional o efeito da velocidade do ar decresce rapidamente próximo ao PSF, enquanto que na secagem a alta temperatura este efeito ainda é pronunciado para teor de umidade bem abaixo do PSF



(Figura 4 e 5). HANS<sup>13</sup>, verificou que na secagem convencional de Liriodendrum tulipifaro em teor de umidade abaixo de 40% não há aumento na taxa de secagem com o aumento da velocidade do ar e recomenda por razões econômicas velocidades do ar menor que 1,2m/s. Estudos conduzidos por SALAMON e MCLNTYRE<sup>30</sup>, mostram que uma combinação de velocidades do ar de 4,5m/s até o PSF e cerca de 2,0m/s abaixo do PSF reduzem o tempo de secagem na ordem de 18% para madeira de Tsuga heterophylla, 15% para Picea engelmannii e cerca de 25% para Pseudotsuga mensiesii, além é claro de trazer uma substancial economia de energia.

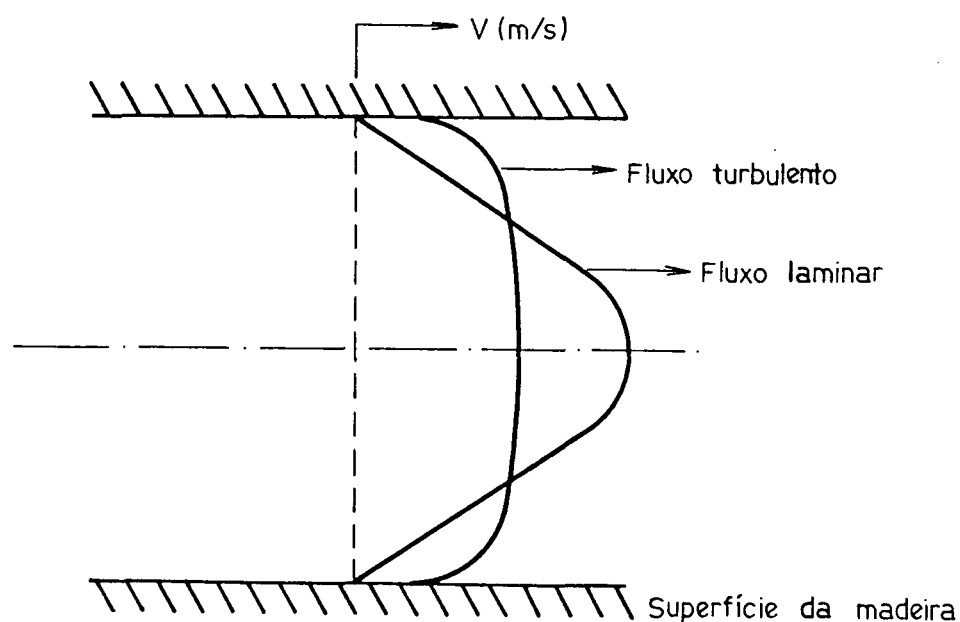


Figura 3 - Distribuição da velocidade do ar em fluxo turbulento e fluxo laminar.

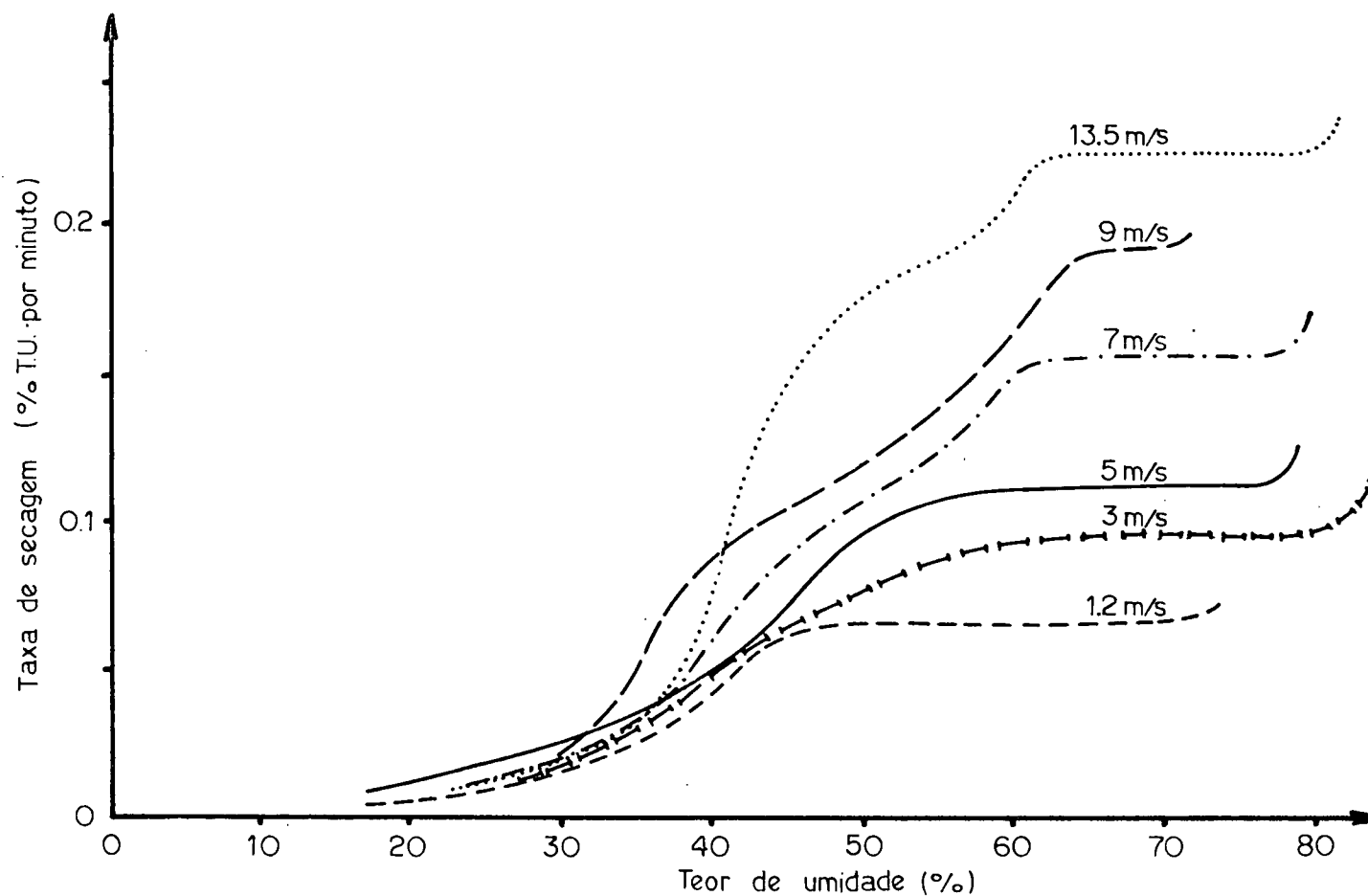


Figura 4 - Influência da velocidade de circulação do ar sobre a taxa de secagem de Fagus Sylvatica, temperatura 65°C e 75% de umidade relativa. (KOLLMANN e SCHNEIDER, 1961)

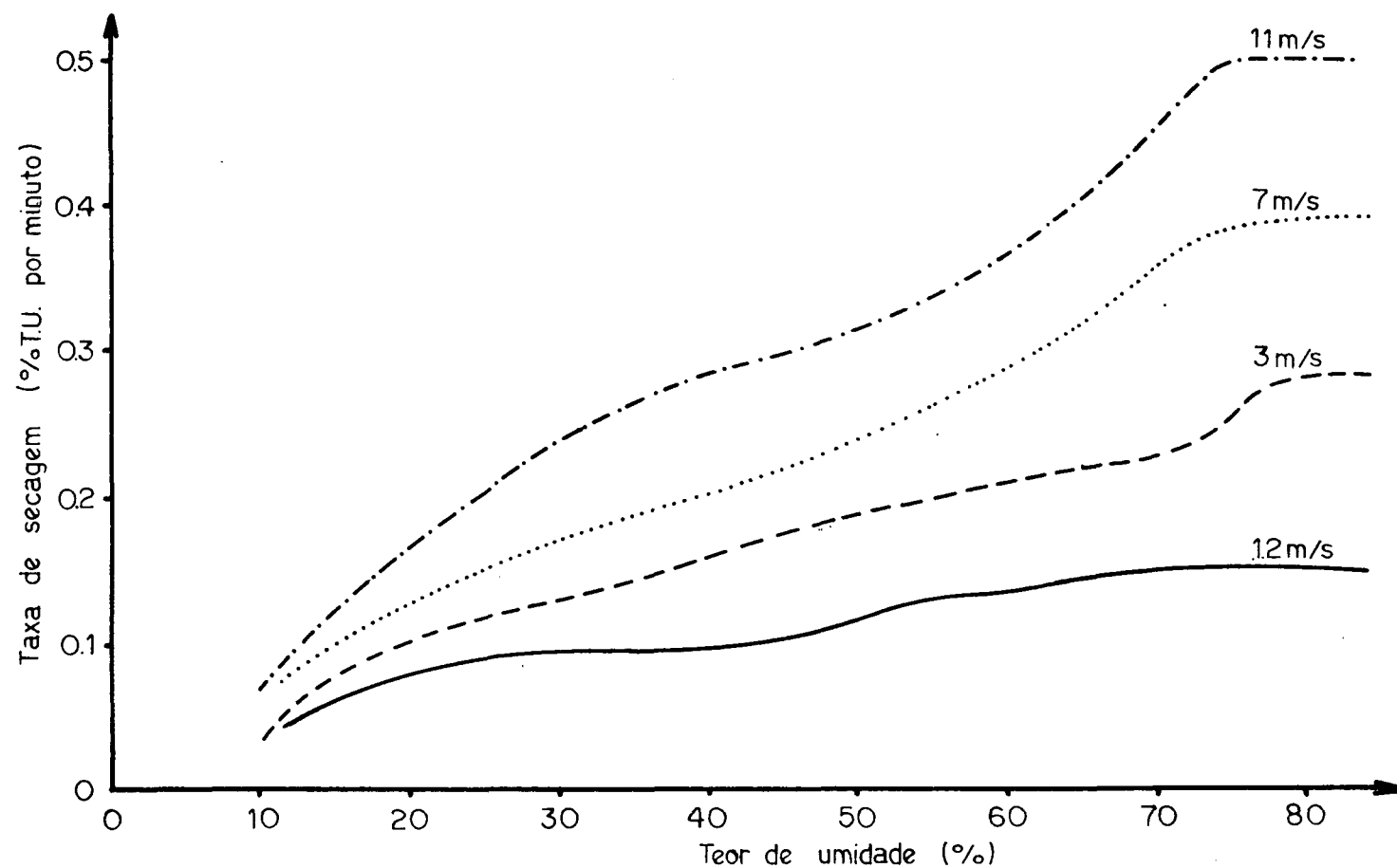


Figura 5 - Influência da velocidade de circulação do ar sobre a taxa de secagem de alburno de Pinus Sylvestris. Secagem à 113°C. (KOLLMANN e SCHNEIDER, 1961).

### 2.3. Consumo de energia

A crise energética dos últimos anos, aliada aos altos custos de secagem, onde muitas vezes como no caso do Pinus spp, chega a representar 50% dos custos de produção e 70% do consumo energético global da indústria de transformação primária desta espécie, vem despertando cada vez mais o interesse pelo aperfeiçoamento das técnicas de secagem que visam a redução do consumo de energia.

O consumo de energia em uma estufa para madeira serrada pode ser dividido em três grupos distintos: aquecimento, vaporização e circulação do ar. O aquecimento para KOCH<sup>21</sup> é responsável por cerca de 80% do consumo total de energia na secagem convencional e cerca de 65% do consumo na secagem à alta temperatura. Segundo VILLIERRE<sup>49</sup>, COMSTOCK<sup>6</sup>, ROSEN<sup>29</sup>, TOMASELLI<sup>41-42</sup>, HATTON<sup>12</sup>, SHOTTAFFER<sup>33</sup>, esta energia é necessária para:

- a) Aquecer o ar existente dentro da estufa;
- b) Aquecer a estrutura da estufa;
- c) Aquecer a madeira;
- d) Aquecer os separadores;
- e) Evaporar a água da madeira;
- f) Aquecer o ar de renovação;
- g) Compensar perdas.

A secagem à alta temperatura ou seja, aquela conduzida em temperaturas acima de 100°C é citada por KOCH<sup>20</sup>, como um processo de secagem onde o consumo de energia é significativamente menor que na secagem convencional. O comportamento do consumo de energia para diversas temperaturas, foi obtido experimentalmente por TOMASELLI<sup>42</sup> em estufa de laboratório sem ventilação e controle de umidade (Figura 6). Para TOMASELLI o consumo de energia na secagem à alta temperatura, é maior quando considerado em determinado intervalo de tempo, no entanto como a duração da secagem é significativamente menor, o consumo total do processo é cerca da metade do obtido em estufa convencional.

Estudos conduzidos por KOCK<sup>21</sup> com madeira de Pinus spp mostrou que o consumo de energia, considerando-se a energia necessária para o aquecimento, vaporização e ventilação na secagem convencional como sendo de 1200 kWh, enquanto que na secagem à alta temperatura é cerca de 620 kWh. Porém diz o autor que os resultados não podem ser transferidos diretamente para a prática. Dados obtidos por KEYLWERTH<sup>18</sup>, mostram que o emprego da secagem à alta temperatura requer de 1,2 a 1,5 kWh por kilograma de água evaporada, em comparação com 2 a 4 kWh por kilograma de água evaporada na secagem convencional. Estudos mais recentes conduzidos por

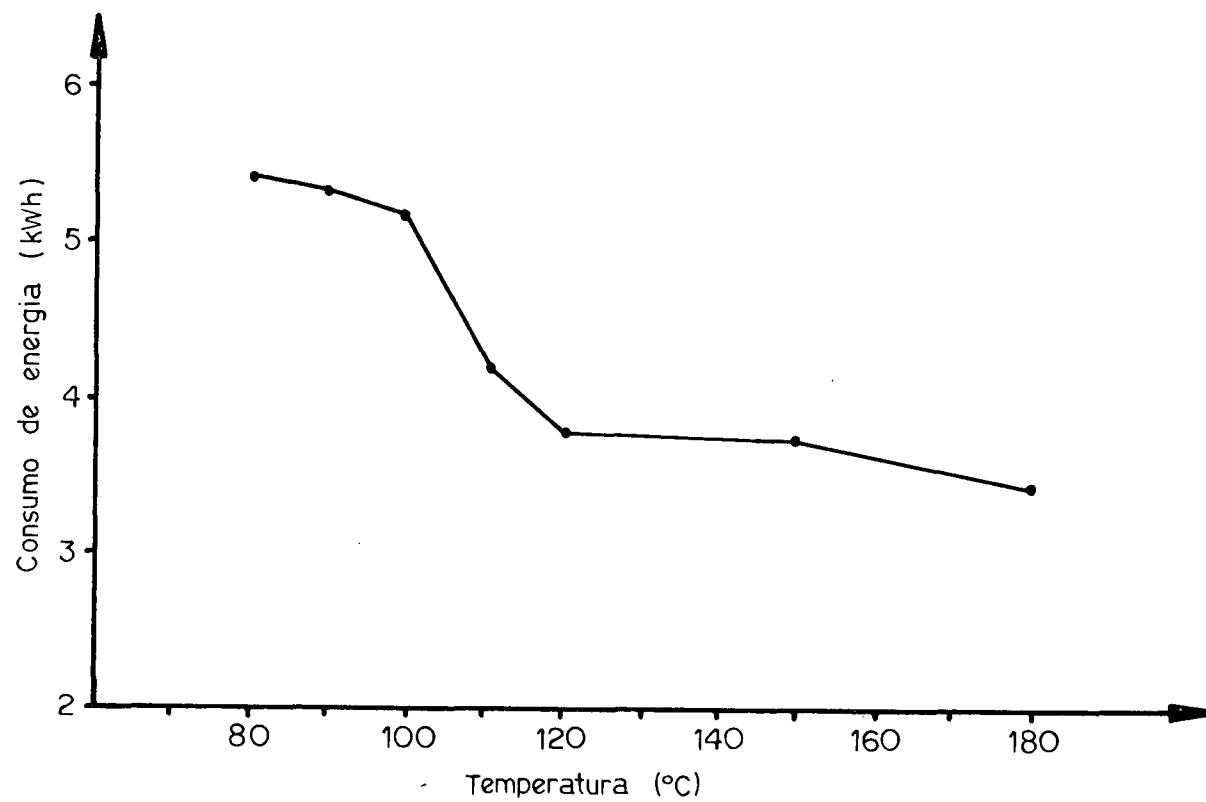


Figura 6 - Consumo total de energia para secagem de *Pinus elliottii* em estufa de laboratório nas diversas temperaturas. (TOMASELLI, 1981)

KININMONTH, MILLER e RILEY<sup>19</sup>, com madeira de Pinus spp mostrou que a secagem à alta temperatura requer cerca de 1,0 kWh por kilograma de água evaporada, enquanto que a secagem convencional requer cerca de 1,4 kWh por kilograma de água evaporada. Com base nestes dados, pode-se mencionar que a secagem à alta temperatura reduz o consumo de energia em cerca de 30%, quando comparada com a secagem convencional.

### 3. MATERIAL E METODOS

#### 3.1. Coleta do Material

O material utilizado no presente estudo foi coletado aleatoriamente na forma de tábuas em uma serraria localizada no município de Colombo - PR. O lote de madeira selecionado era procedente do primeiro desbaste de um povoamento de Pinus elliottii com 10 anos de idade.

Aproximadamente 2,5 metros cúbicos de tábuas com comprimento variando de 3,0 a 3,3m, espessura aproximada de 25mm e largura variável, foram transportadas para o laboratório de tecnologia da madeira da Universidade Federal do Paraná.

#### 3.2. Preparo do Material

No laboratório, este material com massa específica básica, ou seja, a relação entre massa seca(g) e volume verde ( $\text{cm}^3$ ), variando de 0,32  $\text{g}/\text{cm}^3$  e 0,42 $\text{g}/\text{cm}^3$  foi aplainado em ambas as faces, bitolados na espessura de 25mm e seccionados em corpos de prova de 800 mm de comprimento. Após uma rápida seleção visando retirar os corpos de prova que apresentassem defeitos graves, estes foram numerados e banhados num produto preservativo a base de Aldrin e Pentaclorofenol à 3% de concentração. A seguir o material



foi agrupado aleatoriamente em 9 lotes de aproximadamente  $0,14\text{m}^3$  cada e envoltos em plástico, procurando-se assim manter o teor de umidade inicial o mais uniforme possível até sua utilização.

### 3.3. Equipamento Utilizado

A estufa utilizada neste estudo é de construção metálica, com dimensões internas úteis de  $0,8\text{m} \times 0,8\text{m} \times 4,0\text{m}$  de largura, altura e comprimento respectivamente, o que permite um volume de madeira de aproximadamente  $1\text{m}^3$ , sendo que sómente uma parte desta capacidade foi utilizada (Figura 7).

O sistema de aquecimento é elétrico, com controle de temperatura e umidade relativa semi-automático. O sistema de ventilação produz um fluxo longitudinal de ar de  $1\text{m}^3/\text{s}$ , não possuindo sistema de controle de velocidade do ar. A variação da velocidade do ar, sómente é conseguida pela alteração das áreas de passagem do ar através da pilha.

A estufa possui ainda um sistema de medição contínua do teor de umidade da madeira dotado de compensadores de temperatura para 10 pontos de detecção podendo ser distribuídos na pilha de madeira.

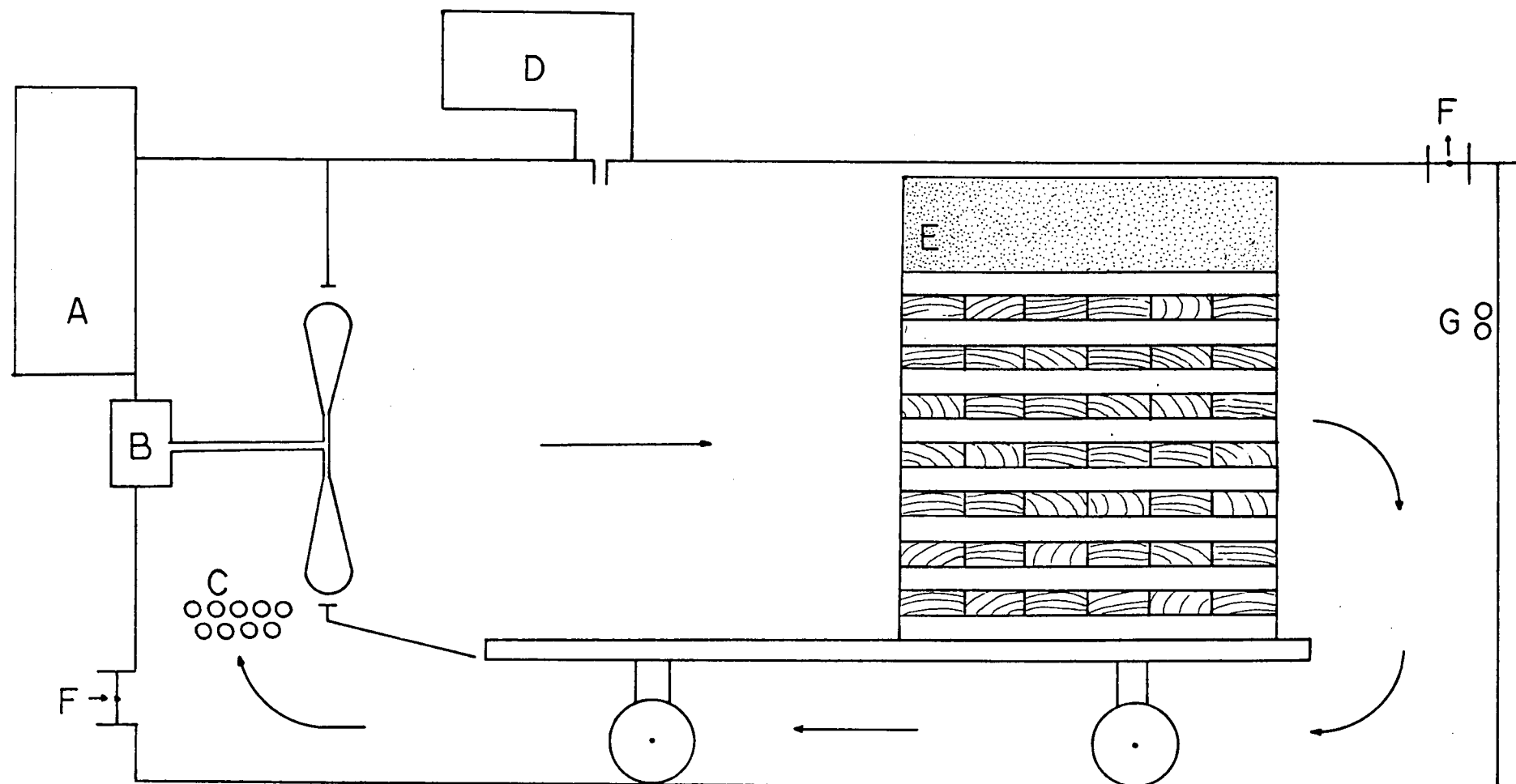


Figura 7 - Esquema simplificado da estufa utilizada no presente estudo.

A - painel de controle  
 B - ventilador  
 C - resistencia elétrica  
 D - caldeira

E - bloco de concreto  
 F - entrada e saída de ar  
 G - instrumentos de medição

### 3.4. Empilhamento

A madeira foi empilhada na estufa de maneira que o fluxo do ar atuasse perpendicularmente ao comprimento da pilha. Este procedimento foi adotado visando facilitar a retirada das amostras testes para pesagem, e obter pilhas de  $0,14\text{m}^3$  de madeira que permitissem áreas transversais de passagem do ar de  $0,4\text{m}^2$ ,  $0,18\text{m}^2$  e  $0,11\text{m}^2$ , necessárias para obtenção de velocidades do ar de  $2,5\text{m/s}$ ,  $5,5\text{m/s}$  e  $8,5\text{m/s}$  respectivamente. Após o empilhamento estas velocidades do ar foram conferidas com um anemômetro.

Para manter a madeira sob restrição, colocou-se um bloco de concreto sobre as cargas, exercendo uma pressão entre  $80 - 160 \text{ kgf/m}^2$  dependendo do tamanho das pilhas. Segundo MACKAY<sup>25</sup>, a restrição da madeira durante a secagem é mencionada como sendo um fator de alta importância para secagem à alta temperatura minimizando o aparecimento de defeitos como empenamentos e encanoamentos muito comum na madeira jovem de Pinus spp. Segundo BRAMHAL e WELLWOOD<sup>1</sup> uma pressão entre  $53$  e  $110 \text{ kgf/m}^2$  é o suficiente para manter a pilha sob restrição.

### 3.5. Condições de Secagem

Foram utilizadas três temperaturas de secagem:  $50^\circ\text{C}$ ,

80°C e 110°C com velocidades do ar de 2,5m/s, 5,5m/s e 8,5m/s em cada temperatura, totalizando 9 tratamentos. Manteve-se em todos os tratamentos o mesmo volume de madeira, espessura das tábuas e umidade relativa do ar. (Tabela 1)

Para seleção das temperaturas de bulbo seco partiu-se do princípio que estas deveriam abranger tanto o processo de secagem convencional, como também o processo de secagem à alta temperatura. Convém salientar que o equipamento de secagem não permite temperaturas de (Bs) superiores a 110°C. As temperaturas de bulbo úmido foram ajustadas de maneira a proporcionar uma umidade relativa do ar constante no interior da estufa de 49% em todos os tratamentos. Para seleção das velocidades do ar tomou-se como base a velocidade do ar de 2,5m/s recomendada na secagem convencional e duas velocidades mais elevadas utilizadas na secagem à alta temperatura (5,5m/s e 8,5m/s).

TEMPERATURAS(°C)		VELOCIDADE DO AR (m/s)	UMIDADE RELATIVA DO AR (%)	ESPESSURA DA MADEIRA (mm)	VOLUME DE MADEIRA (m³)
TBS	TBU				
50	38	2,5	48	25	0,14
		5,5			
		8,5			
80	64	2,5	49	25	0,14
		5,5			
		8,5			
110	88	2,5	49	25	0,14
		5,5			
		8,5			

TBS - TEMPERATURA DO TERMÔMETRO DE BULBO SECO

TBU - TEMPERATURA DO TERMÔMETRO DE BULBO ÚMIDO

Tabela 1 - Programas utilizados para secagem de Pinus  
elliottii.

### 3.6. Determinação do Teor de Umidade

Para determinação do teor de umidade da carga de madeira, utilizou-se três amostras colocadas na parte frontal da pilha para facilitar a retirada para pesagem. Estas amostras, obtidas da mesma forma que os demais corpos de prova, foram inicialmente pesados ( $M_v$ ) e após, em intervalos regulares de 8 horas para temperatura de  $50^{\circ}\text{C}$ , 6 horas para temperatura de  $80^{\circ}\text{C}$  e 4 horas para temperatura de  $110^{\circ}\text{C}$ , considerou-se concluída a secagem quando a quantidade de água evaporada tornou-se desprezível. A massaseca ( $M_s$ ) das amostras, foi obtido em estufa elétrica a  $103 \pm 2^{\circ}\text{C}$  até massa constante. De posse da massa seca, o teor de umidade inicial das amostras testes foi determinado pela equação (5).

$$T_{ui} = \frac{M_v - M_s}{M_s} \times 100 \dots\dots\dots(5)$$

onde:

$T_{ui}$  = teor de umidade inicial da amostra (%)

$M_v$  = massa verde da amostra teste (g)

$M_s$  = massa seca da amostra teste (g)

### 3.7. Determinação dos Tempos de Secagem

Para a determinação dos tempos de secagem nos intervalos de unidade de verde até 10%, verde até 30% e de 30% até 10%, utilizou-se gráficos % de unidade versus tempo de secagem para cada amostra teste.

### 3.8. Determinação da Taxa de Secagem

As taxas de secagem foram calculadas para os intervalos de unidade de verde até 10%, verde até 30% e de 30% até 10% pela equação (6).

$$Ts = \frac{M_{\text{água}}}{t} \times \frac{1}{A} \dots\dots\dots(6)$$

onde:

Ts = taxa de secagem para um determinado intervalo de unidade (kg/cm<sup>2</sup>.h)

M<sub>água</sub> = massa d'água removida da madeira (kg)

t = tempo de secagem (h)

A = área de evaporação em cm<sup>2</sup>

Para verificar a quantidade de água evaporada para os

teores de umidade de 30% e 10% determinou-se as massas das amostras teste nestes intervalos de umidade através da equação (7).

$$Mdt = \frac{Mv \times (Tud + 100)}{Tui + 100} \dots\dots\dots(7)$$

onde:

Mdt = massa d'água a um determinado teor de umidade(kg)

Mv = massa da amostra verde (g)

Tud = teor de umidade desejado (%)

Tui = teor de umidade inicial (%)

Através da diferença entre a massa das amostras verdes e as massas a 30% e 10%, e ainda de 30% até 10% obteve-se as quantidades de água evaporada para os respectivos intervalos de umidade.

### 3.9. Consumo de Energia

#### 3.9.1. Consumo de Energia em Estufa Piloto

Para avaliação do consumo de energia em cada secagem, foram empregados medidores de consumo em kWh. Estes medidores foram instalados nos sistemas de aquecimento,



sistemas de vaporização e sistema de ventilação da estufa.  
(Figura 8)

Após a leitura inicial do consumo, as demais foram realizadas nos intervalos de pesagem das amostras testes. O objetivo desta avaliação visou principalmente a comparação de consumo entre as temperaturas, e entre as velocidades do ar numa mesma temperatura.

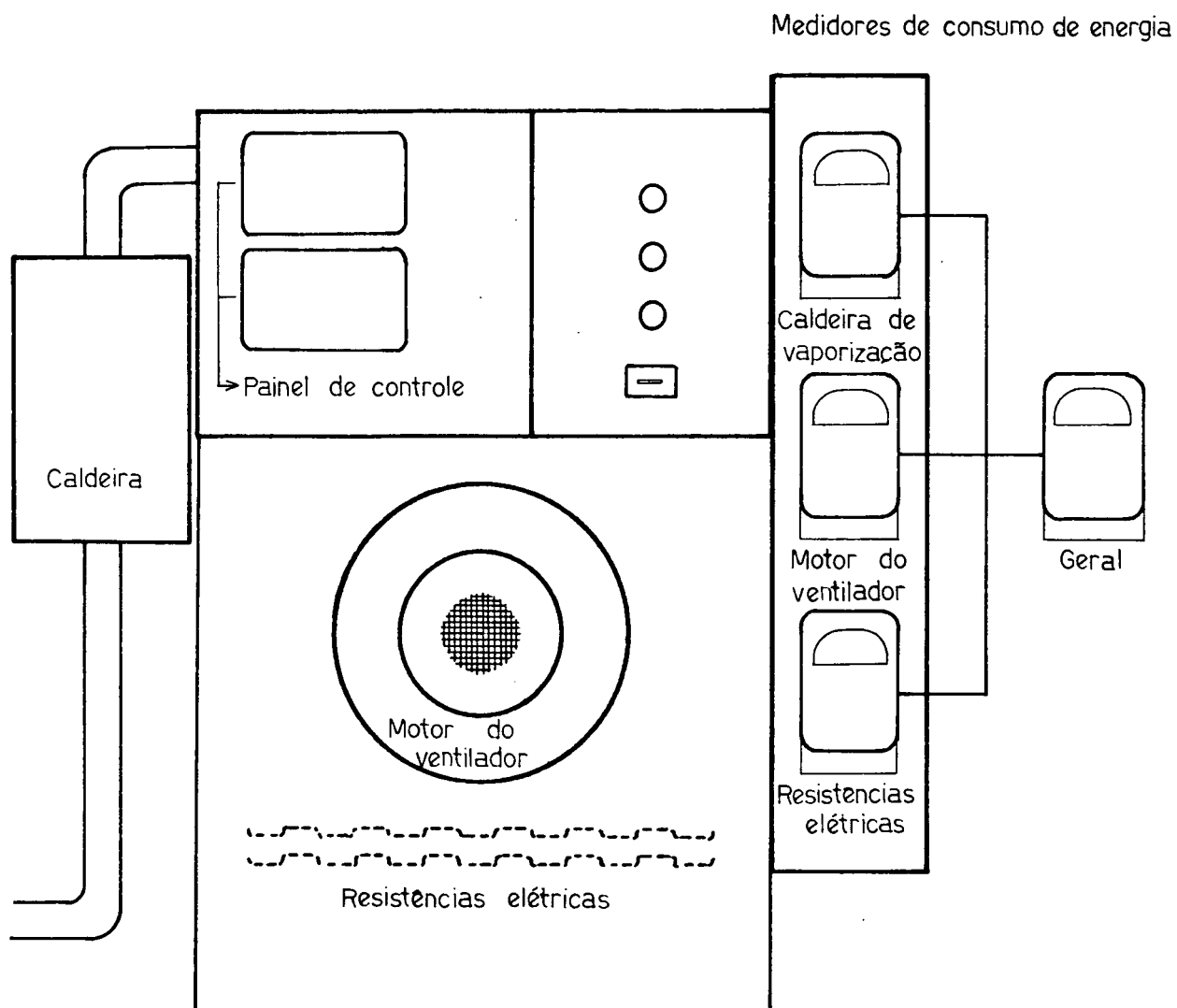


Figura 8 - Medidores de consumo de energia acoplados ao sistema de aquecimento, vaporização e ventilação da estufa.

### 3.9.2. Consumo Teórico de Energia

Para avaliação do consumo teórico de energia foram empregados as mesmas condições de secagem empregado em estufa piloto.(Item 3.5)

Para o cálculo do consumo teórico de energia, tomou-se como base os procedimentos adotados por VILLIERE<sup>4º</sup>; HATTON<sup>12</sup>; ECKELMAN e BAKER<sup>º</sup>; ROSEN<sup>2º</sup>; MENDES<sup>2º</sup>, KININMONTH, MILLER e RILEY<sup>1º</sup>. Convém salientar que o procedimento adotado refere-se somente aos gastos de energia necessário ao sistema de aquecimento da estufa.(vide anexo 1)

### 3.10. Avaliação dos Defeitos de Secagem

O material submetido a secagem foi avaliado quanto a defeitos como rachaduras, empenamentos, mudança de cor e exudações de resinas.

Esta avaliação, além de ter sido realizada no final do processo de secagem, foi também feito nas amostras testes durante os intervalos de pesagem. Este procedimento adotado visava detectar o início de possíveis anormalidades e o seu desenvolvimento durante a secagem.

Após o término da secagem os corpos de prova foram aplainados entre 1mm e 4mm para verificar a intensidade dos defeitos e a existência de mancha marrom.

## **4. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **4.1.Considerações iniciais**

Neste estudo adotou-se os intervalos de umidade de verde até 10%, verde até 30% e 30% até 10%, nos quais analisou-se o efeito da temperatura e velocidade do ar no tempo de secagem, taxa de secagem e consumo de energia. Estes intervalos de umidade foram adotados em função dos fenômenos físicos que movimentam a umidade do interior para a superfície acima e abaixo do PSF (30%).

### **4.2.Tempo de secagem**

Uma análise preliminar demonstrou não haver diferença significativa entre os teores de umidade inicial das amostras testes.(vide anexo 2) Este procedimento foi adotado pois, segundo KOLLMANN e COTE<sup>23</sup>, quanto maior a diferença entre teor de umidade inicial e teor de umidade final, maior é o tempo necessário para secagem da madeira.

Para determinação dos tempos de secagem, foram traçadas curvas de secagem pelas amostras testes. Através destas curvas foi possível determinar os tempos de secagem nos intervalos de umidade de verde até 10%, verde até 30% e de 30% até 10%. Uma síntese dos resultados, mostrando o teor de umidade inicial e os tempos de secagem obtidos, encontra-se

na tabela 2. Uma melhor visualização dos tempos de secagem são mostrados na Figura 9.

Com base nos resultados da tabela 2, pode-se mencionar que o aumento na temperatura de 50° para 110°, independentemente da velocidade do ar empregada reduziu o tempo de secagem em cerca de 4,5 vezes no intervalo de umidade de verde até 10%; 3,0 vezes no intervalo de verde até 30% e 9,5 vezes no intervalo de 30% até 10%. Para HART<sup>15</sup>, esta maior redução no tempo de secagem, obtido no intervalo de umidade de 30% até 10%, deve-se ao efeito que a temperatura exerce sobre o movimento de umidade por difusão. Da mesma forma, o aumento da velocidade do ar de 2,5m/s para 8,5m/s, no âmbito das temperaturas de 50°C, 80°C e 110°C, reduziram o tempo de secagem em cerca de 14%, 19% e 36% respectivamente no intervalo de umidade de verde até 10%; 17%, 29% e 42% respectivamente no intervalo de verde até 30%. No entanto no intervalo de umidade de 30% até 10%, as reduções no tempo de secagem não foram significativas. Estes resultados mostram que o aumento da velocidade do ar reduz o tempo de secagem, principalmente na fase de retirada da água livre.

TEMPERATURA (°C)	VELOCIDADE DO AR (m/s)	UMIDADE INICIAL (%)	TEMPOS DE SECAGEM NOS INTERVALOS DE UMIDADE (h)		
			VERDE ATÉ 10%	VERDE ATÉ 30%	30% ATÉ 10%
50	2,5	187,0	69,0	32,0	37,0
	5,5	180,5	64,0	28,0	36,0
	8,5	182,5	59,5	27,0	32,5
80	2,5	171,5	29,5	19,0	10,5
	5,5	180,3	26,0	16,0	10,0
	8,5	185,0	24,0	13,5	10,5
110	2,5	189,5	16,9	13,0	3,9
	5,5	165,5	13,9	10,0	3,9
	8,5	195,0	10,9	7,5	3,4

Tabela 2 - Tempos de secagem nos intervalos de umidade estudados, para os diversos tratamentos.

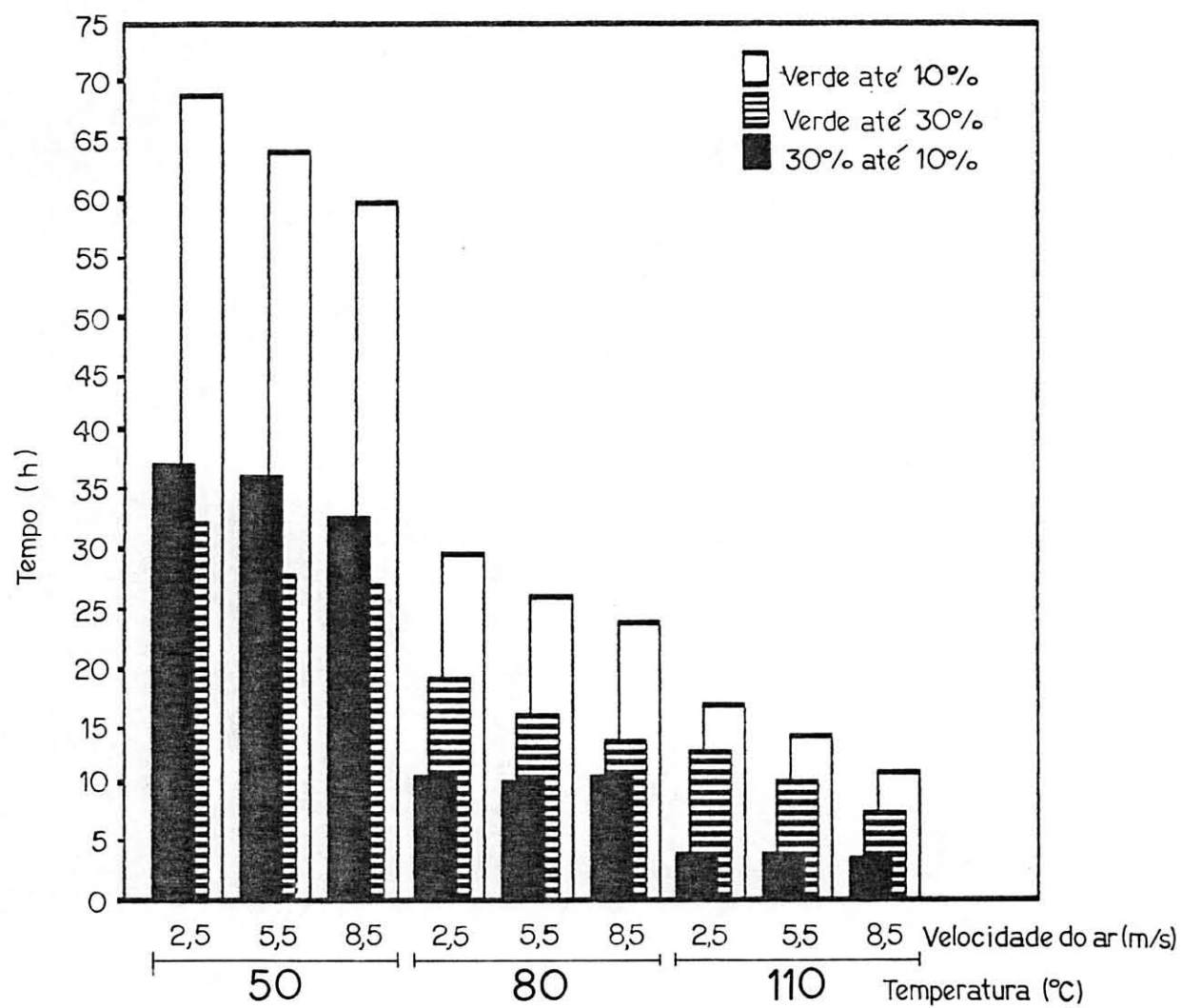


Figura 9 - Tempos de secagem nos intervalos de umidade estudados, para os diversos tratamentos.



#### 4.3. Defeitos de Secagem

De uma maneira geral, a madeira proveniente dos tratamentos na temperatura de 50°C, apresentou uma mudança da cor natural para uma tonalidade amarelada, enquanto que a madeira proveniente dos tratamentos nas temperaturas de 80°C e 110°C, apresentaram um escurecimento superficial. Este escurecimento aumentou gradativamente com o aumento da velocidade do ar no âmbito das temperaturas de 80°C e 110°C. Para TOMASELLI e GROSSMANN<sup>43</sup>, este aumento no escurecimento é provavelmente resultado de uma maior transferência de calor a superfície da madeira. Como já detectado experimentalmente, o aumento da temperatura da madeira próximo a superfície, para uma determinada condição de secagem, é diretamente correlacionada com a velocidade do ar.

O aumento da temperatura, principalmente à 110°C, fez com que surgissem exudações de resinas nos corpos de prova que apresentavam nós ou pequenas bolsas de resina, além de causar distorções em regiões próximas aos nós e irregularidades na superfície do material. Segundo KOCH<sup>20</sup>, KOLLMANN e COTE<sup>23</sup>, estas distorções são ocasionadas pelo desvio da grã e outras irregularidades da estrutura da madeira existente em locais próximos aos nós. Convém salientar, que a mudança de tonalidade externa da madeira, e

a exudação de resina não afetaram a qualidade do material, uma vez que foram removidos com o aplainamento dos corpos de prova em aproximadamente 1mm. Estas observações são semelhantes as obtidas por TOMASELLI<sup>42</sup>, com a mesma espécie em estufa de laboratório sem ventilação e controle de umidade relativa.

No entanto, os corpos de prova provenientes de tratamentos secos nas temperaturas de 80°C e 110°C que apresentavam escurecimento superficial, após serem aplainados evidenciaram a presença de mancha marrom. Para eliminar esta mancha foi necessário remover de 2mm a 4mm de uma das faces da madeira. Resultados semelhantes foram obtidos por TOMASELLI<sup>44</sup> trabalhando com a mesma espécie, porém em estufa de laboratório sem ventilação e controle de umidade relativa.

A presença de defeitos como fendas internas e fendas superficiais não foram observadas em nenhuma temperatura testada. Os corpos de prova provenientes de tratamentos secos na temperatura de 80°C, foram os que apresentaram o maior índice de defeitos como encanoamentos e empenamentos. Os corpos de prova provenientes de tratamentos secos na temperatura de 110°C, apresentaram em alguns casos empenamentos, apesar de terem sido submetidos a restrição. Este tipo de defeito é citado por CHRISTENSEN<sup>5</sup>, como um dos

principais problemas de secagem de madeira juvenil de Pinus spp de rápido crescimento.

#### 4.4. Taxa de Secagem

A taxa de secagem, que se refere a quantidade de água evaporada num determinado período de tempo, foi calculada para os intervalos de umidade de verde até 10%, verde até 30% e de 30% até 10% pela equação (6). Apesar desta equação não ser a mais apropriada, uma vez que considera a taxa de secagem como sendo linear em função do tempo durante todo o período considerado, é perfeitamente válida para os objetivos do estudo pois serve de parâmetro de comparação entre as temperaturas, velocidades do ar e interações destes dois fatores.

As taxas de secagem ( $T_s$ ) calculadas utilizando-se a equação(6) são apresentadas na tabela 3.

TEMP. (°C)	VELOC. DO AR (m/s)	VERDE ATÉ 10%						VERDE ATÉ 30%						30% ATÉ 10%					
		AMOSTRA 1		AMOSTRA 2		AMOSTRA 3		AMOSTRA 1		AMOSTRA 2		AMOSTRA 3		AMOSTRA 1		AMOSTRA 2		AMOSTRA 3	
		TUI(%)	Ts	TUI(%)	Ts	TUI(%)	Ts	TUI(%)	Ts	TUI(%)	Ts	TUI(%)	Ts	TUI(%)	Ts	TUI(%)	Ts	TUI(%)	Ts
50	2,5	181,0	0,87	195,0	1,09	184,0	0,78	181,0	1,62	195,5	1,93	184,0	1,74	30	0,19	30	0,23	30	0,14
	5,5	174,5	0,81	199,0	1,25	168,5	0,83	174,5	1,95	199,0	1,70	168,5	1,76	30	0,28	30	0,25	30	0,17
	8,5	198,0	1,28	204,0	1,12	145,0	1,21	198,0	1,72	204,0	1,85	145,0	2,18	30	0,27	30	0,24	30	0,33
80	2,5	211,5	2,36	145,0	1,69	158,0	2,14	211,5	3,22	145,0	2,11	158,0	2,64	30	0,61	30	0,72	30	0,88
	5,5	149,5	1,91	221,5	2,67	170,0	2,23	149,5	3,26	221,5	3,28	170,0	3,36	30	0,86	30	0,82	30	0,62
	8,5	220,0	3,36	206,5	3,15	129,0	2,75	220,0	4,96	206,5	4,55	129,0	3,83	30	0,74	30	0,80	30	0,81
110	2,5	199,5	4,05	170,5	3,67	198,5	4,24	199,5	4,33	170,5	3,93	198,5	4,91	30	2,07	30	2,00	30	1,77
	5,5	157,5	4,91	161,5	4,35	178,0	5,22	157,5	5,67	161,5	4,48	178,0	5,90	30	2,22	30	1,97	30	2,31
	8,5	181,5	6,26	193,5	6,56	210,0	6,75	181,5	7,76	193,5	7,38	210,0	8,06	30	2,28	30	2,15	30	2,43

Ts = TAXA DE SECAGEM (g/cm<sup>2</sup>.h x 10<sup>-2</sup>)

TUI(%)= TEOR DE UNIDADE UNICIAL

Tabela 3 - Taxa de Secagem para os intervalos de umidade de verde até 10%, verde até 30% e de 30% até 10% para Pinus elliottii.

#### 4.4.1. Efeito da Temperatura na Taxa de Secagem

Como pode ser observado na tabela 4, independentemente da velocidade do ar empregada, as taxas de secagem aumentam com o aumento da temperatura. Observa-se também que a relação entre a taxa de secagem no intervalo de umidade de verde até 30%, e a taxa de secagem no intervalo de 30% até 10%, reduz significativamente a medida que a temperatura de secagem aumenta. Esta relação mostra claramente o efeito que a temperatura de secagem exerce sobre o movimento de umidade por difusão, uma vez que para temperatura de 50°C o movimento por capilaridade (verde até 30%), é em média 8,0 vezes maior que o movimento por difusão (30% até 10%), enquanto que para temperatura de 110°C, esta relação diminui para aproximadamente 3,0 vezes.

Este aumento da taxa de secagem com a temperatura é altamente significativo como demonstra a análise da variância para os intervalos de umidade considerados (vide anexo 2). As tabelas 6, 7 e 8 apresentam os resultados de um teste a posteriori (Duncan) visando identificar quais as temperaturas que apresentam diferenças significativas entre si. Nestas tabelas observa-se que qualquer aumento de temperatura, proporciona um aumento significativo na taxa de secagem.

VELOCIDADE DO AR (m/s)	TEMPERATURA (°C)	VERDE ATÉ 10%		VERDE ATÉ 30%		30% ATÉ 10%		RELACÃO ENTRE Ts DE VERDE ATÉ 30% E Ts DE 30% ATÉ 10%
		n	Ts	n	Ts	n	Ts	
2,5	50	3	0,9123	3	1,7588	3	0,1861	9,5
	80	3	2,0614	3	2,6582	3	0,7398	3,5
	110	3	3,9866	3	4,3864	3	1,9472	2,0
5,5	50	3	0,9648	3	1,8014	3	0,2341	7,7
	80	3	2,2679	3	3,3000	3	0,7660	4,3
	110	3	4,8267	3	5,3516	3	2,1668	2,5
8,5	50	3	1,2054	3	1,9187	3	0,2790	6,9
	80	3	3,0861	3	4,4457	3	0,7850	5,7
	110	3	6,5244	3	7,7321	3	2,2859	3,4

Ts = TAXA DE SECAGEM ( $\text{g}/\text{cm}^2 \cdot \text{h} \times 10^{-2}$ )

n = NÚMERO DE REPETIÇÕES

Tabela 4 - Taxas de secagem médias para variação da temperatura dentro da velocidade do ar.

Nas figuras 10, 11 e 12 é mostrado o comportamento da taxa de secagem com a temperatura nos intervalos de umidade de verde até 10%, verde até 30% e de 30% até 10% respectivamente. Um fato observado nestas figuras é que, não existe uma mudança abrupta nas taxas de secagem obtidos em temperaturas imediatamente abaixo e acima do ponto de ebulição da água. Este fato já havia sido anteriormente observado por TOMASSELLI<sup>42</sup>, sugerindo o referido autor que o fluxo hidrodinâmico esteja também presente abaixo do ponto de ebulição da água, e portanto, à medida que a temperatura aumenta, o fluxo hidrodinâmico tem uma maior participação no total de massa removida.

As taxas de secagem nos intervalos de umidade de verde até 10% e de 30% até 10%, podem ser determinadas pela equação (8), e no intervalo de umidade de verde até 30% pela equação (9). Estas equações apresentaram excelentes ajustes de dados, com coeficientes de determinação ( $R^2$ ) variando de 0,90 a 0,99 e portanto, dentro das limitações experimentais do estudo podem ser utilizadas para estimar as taxas de secagem de Pinus elliottii em função das temperaturas e para uma determinada velocidade do ar.

$$y = a x^b \dots\dots\dots(8)$$

$$y = e^a + b x \dots\dots\dots(9)$$

Comparando-se a equação (8) com a equação da reta proposta por SANTINI<sup>31</sup>, para determinação das taxas de secagem de Pinus elliottii, observa-se que os resultados obtidos neste estudo, são superiores em média 30% aos obtidos por SANTINI nas temperaturas de 80°C e 110°C, aumentando significativamente esta diferença até atingir a temperatura de 60°C. Abaixo desta temperatura não é mais possível realizar uma comparação entre os resultados, uma vez que a equação de SANTINI apresenta valores negativos, o que evidentemente, não representa a situação prática. Este aumento da taxa de secagem deve-se principalmente ao efeito da velocidade do ar, uma vez que o estudo de SANTINI, foi realizado em estufa de laboratório sem ventilação e controle da umidade relativa. Espera-se também, que a equação aqui apresentada possua uma maior faixa de utilização, aproximando-se melhor da situação prática.

Apesar dos resultados demonstrarem ganhos significativos na taxa de secagem com o aumento da temperatura, deve-se observar o uso final do material, pois o estudo demonstrou que em temperaturas superiores a 50°C, a qualidade interna do material fica prejudicado pelo surgimento de mancha marrom.



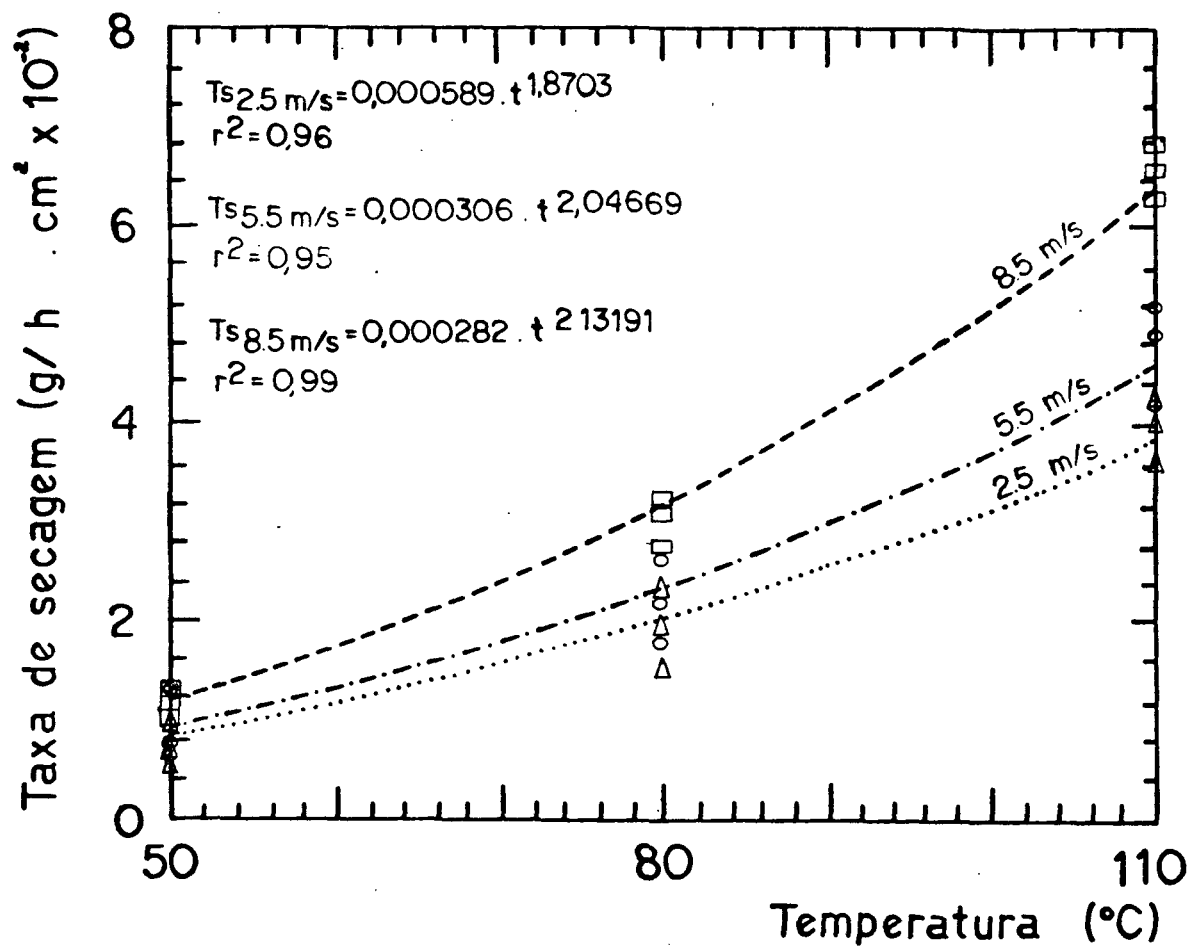


Figura 10 - Comportamento da Taxa de Secagem com a Temperatura no intervalo de umidade de verde até 10%.

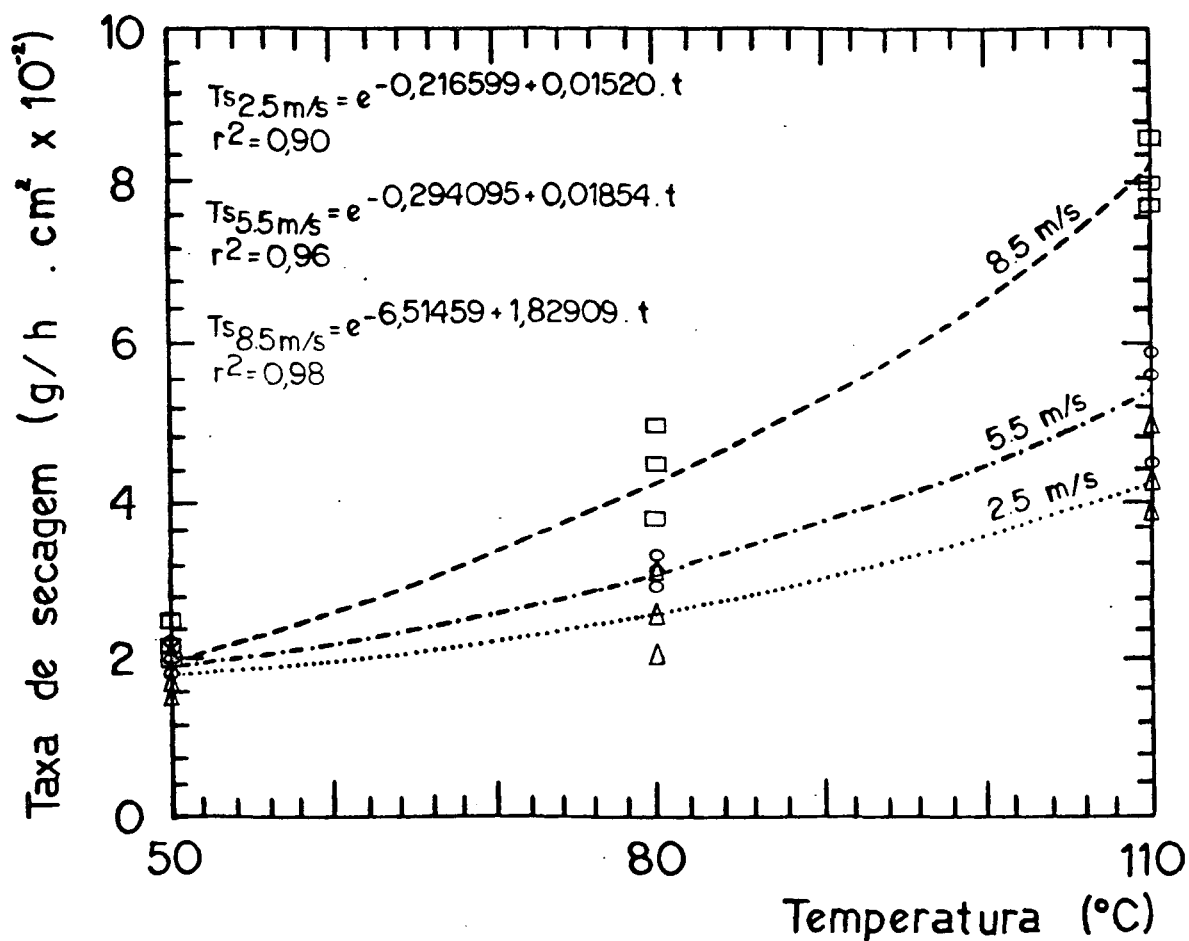


Figura 11 - Comportamento da Taxa de Secagem com a Temperatura no intervalo de umidade de verde até 30%.

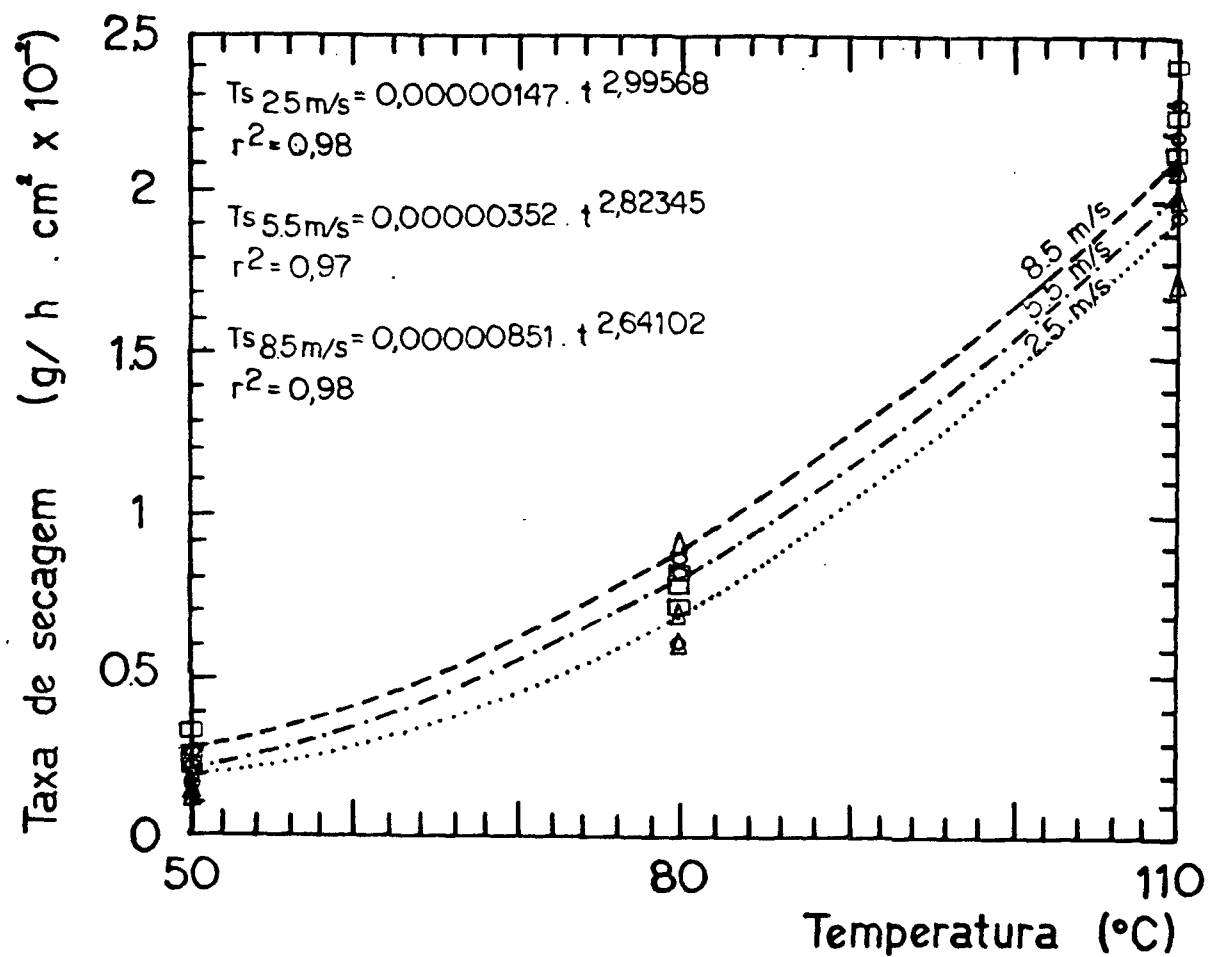


Figura 12 - Comportamento da Taxa de Secagem com a Temperatura no intervalo de umidade de 30% até 10%.

- Δ - Velocidade do Ar 2.5 m/s
- - Velocidade do Ar 5.5 m/s
- - Velocidade do Ar 8.5 m/s

#### 4.4.2. Efeito da Velocidade do Ar na Taxa de Secagem

Como pode ser observado na tabela 5, a taxa de secagem aumenta com o aumento da velocidade do ar no âmbito das temperaturas. Este aumento da taxa de secagem é significativo como demonstra a análise da variância nos intervalos de umidade de verde até 10%, verde até 30% e de 30% até 10% (vide anexo 2).

As tabelas 6, 7 e 8 apresentam os resultados de um teste a posteriori (Duncan), para identificar quais as velocidades do ar que apresentam diferenças significativas entre si no âmbito das temperaturas. Observe nestas tabelas que na temperatura de 50°C nenhuma velocidade do ar apresentou resultados significativos na taxa de secagem. No entanto, o emprego da velocidade do ar de 8,5m/s na temperatura de 80°C foi significativo para o total da secagem (verde até 10%), resultado este atribuído ao efeito da velocidade na fase inicial da secagem (verde até 30%). Na temperatura de 110°C, o efeito da velocidade do ar demonstrou ser mais acentuado, pois qualquer aumento na velocidade do ar foi significativo na taxa de secagem nos intervalos de umidade de verde até 30% e verde até 30%. Neste caso, a velocidade do ar também apresentou resultados significativos no intervalo de umidade de 30% até 10%. Estes resultados são semelhantes aos obtidos por KOLLMANN

e SCHNEIDER<sup>24</sup>. Para SCHNEIDER e WAGNER<sup>32</sup>, TORGENSON<sup>45-46</sup>, isto ocorre porque com a elevação da temperatura de secagem, aumenta-se consideravelmente a evaporação da umidade do interior para superfície do material, logo maiores velocidades do ar são necessárias para remoção desta umidade da superfície do material para o meio secante.

TEMPERATURA (°C)	VELOCIDADE DO AR (m/s)	VERDE ATÉ 10%		VERDE ATÉ 30%		30% ATÉ 10%	
		n	Ts	n	Ts	n	Ts
50	2,5	3	0,9123	3	1,7588	3	0,1861
	5,5	3	0,9648	3	1,8014	3	0,2341
	8,5	3	1,2054	3	1,9187	3	0,2790
80	2,5	3	2,0614	3	2,6582	3	0,7398
	5,5	3	2,2679	3	3,3000	3	0,7660
	8,5	3	3,0861	3	4,4457	3	0,7851
110	2,5	3	3,9866	3	4,3864	3	1,9472
	5,5	3	4,8267	3	5,3516	3	2,1668
	8,5	3	6,5244	3	7,7321	3	2,2859

n = NÚMERO DE REPETIÇÕES

Ts = TAXA DE SECAGEM (g/cm<sup>2</sup>.h) x 10<sup>-2</sup>

Tabela 5 - Taxas de secagem médias para variação da velocidade do ar dentro das temperaturas.

TEMPERATURA X VELOCIDADE DO AR (°C) (m/s)	50(2,5)	50(5,5)	50(8,5)	80(2,5)	80(5,5)	80(8,5)	110(2,5)	110(5,5)	110(8,5)
50(2,5)	-								
50(5,5)	NS	-							
50(8,5)	NS	NS	-						
80(2,5)	**	**	**	-					
80(5,5)	**	**	**	NS	-				
80(8,5)	**	**	**	**	**	-			
110(2,5)	**	**	**	**	**	**	-		
110(5,5)	**	**	**	**	**	**	**	-	
110(8,5)	**	**	**	**	**	**	**	**	-

NS - NÃO SIGNIFICATIVO

\* - SIGNIFICATIVO AO NÍVEL DE 95%

\*\* - SIGNIFICATIVO AO NÍVEL DE 99%

Tabela 6 - Taxa de secagem - Comparação de médias através do teste de Duncan - intervalo de umidade de verde até 10%.

TEMPERATURA X VELOCIDADE DO AR (°C) (m/s)	50(2,5)	50(5,5)	50(8,5)	80(2,5)	80(5,5)	80(8,5)	110(2,5)	110(5,5)	110(8,5)
50(2,5)	-								
50(5,5)	NS	-							
50(8,5)	NS	NS	-						
80(2,5)	†	†	NS	-					
80(5,5)	††	††	††	NS	-				
80(8,5)	††	††	††	††	††	-			
110(2,5)	††	††	††	††	†	NS	-		
110(5,5)	††	††	††	††	††	†	†	-	
110(8,5)	††	††	††	††	††	††	††	††	-

NS - NÃO SIGNIFICATIVO

† - SIGNIFICATIVO AO NÍVEL DE 95%

†† - SIGNIFICATIVO AO NÍVEL DE 99%

Tabela 7 - Taxa de secagem - Comparação de médias através do teste de Duncan - intervalo de umidade de verde até 30%.



TEMPERATURA X VELOCIDADE DO AR (°C) (m/s)	50(2,5)	50(5,5)	50(8,5)	80(2,5)	80(5,5)	80(8,5)	110(2,5)	110(5,5)	110(8,5)
50(2,5)	-								
50(5,5)	NS	-							
50(8,5)	NS	NS	-						
80(2,5)	**	**	**	-					
80(5,5)	**	**	**	NS	-				
80(8,5)	**	**	**	NS	NS	-			
110(2,5)	**	**	**	**	**	**	-		
110(5,5)	**	**	**	**	**	**	NS	-	
110(8,5)	**	**	**	**	**	**	**	NS	-

NS - NÃO SIGNIFICATIVO

\* - SIGNIFICATIVO AO NÍVEL DE 95%

\*\* - SIGNIFICATIVO AO NÍVEL DE 99%

Tabela 8 - Taxa de secagem - Comparação de médias através do teste de Duncan - intervalo de umidade de 30% até 10%.

Uma melhor visualização do efeito da velocidade do ar na taxa de secagem no âmbito das temperaturas de 50°C, 80°C e 110°C são mostradas pelas figuras 13, 14 e 15 respectivamente. Observe que para temperatura de 50°C, o efeito da velocidade do ar sobre a taxa de secagem decresce rapidamente para um teor de umidade entre 40% e 50%, para temperatura de 80°C este efeito prolonga-se até próximo ao PSF (30%), enquanto que para temperatura de 110°C este efeito da velocidade do ar ainda é pronunciado para teor de umidade bem abaixo de 30%. Estes resultados são semelhantes aos obtidos em estudos passados por KOLLMANN e SCHNEIDER<sup>24</sup>. Este prolongamento do efeito da velocidade do ar sobre a taxa de secagem em teores de umidade abaixo de 30%, deve-se em parte ao abaixamento do PSF em decorrência do aumento da temperatura. Segundo SKAAR<sup>37</sup>, SIAU<sup>34</sup> para uma temperatura de 100°C, o PSF é de aproximadamente 20%, fazendo com que a diferença de umidade entre 30% e 20% seja movimentada por forças capilares ao invés do movimento por difusão. Para TOMASELLI<sup>42</sup>, existe ainda a possibilidade da presença do fluxo hidrodinâmico nesta fase de secagem, uma vez que em temperaturas elevadas pressões de vapor acima da pressão atmosférica, embora pequenas, estarão presentes.

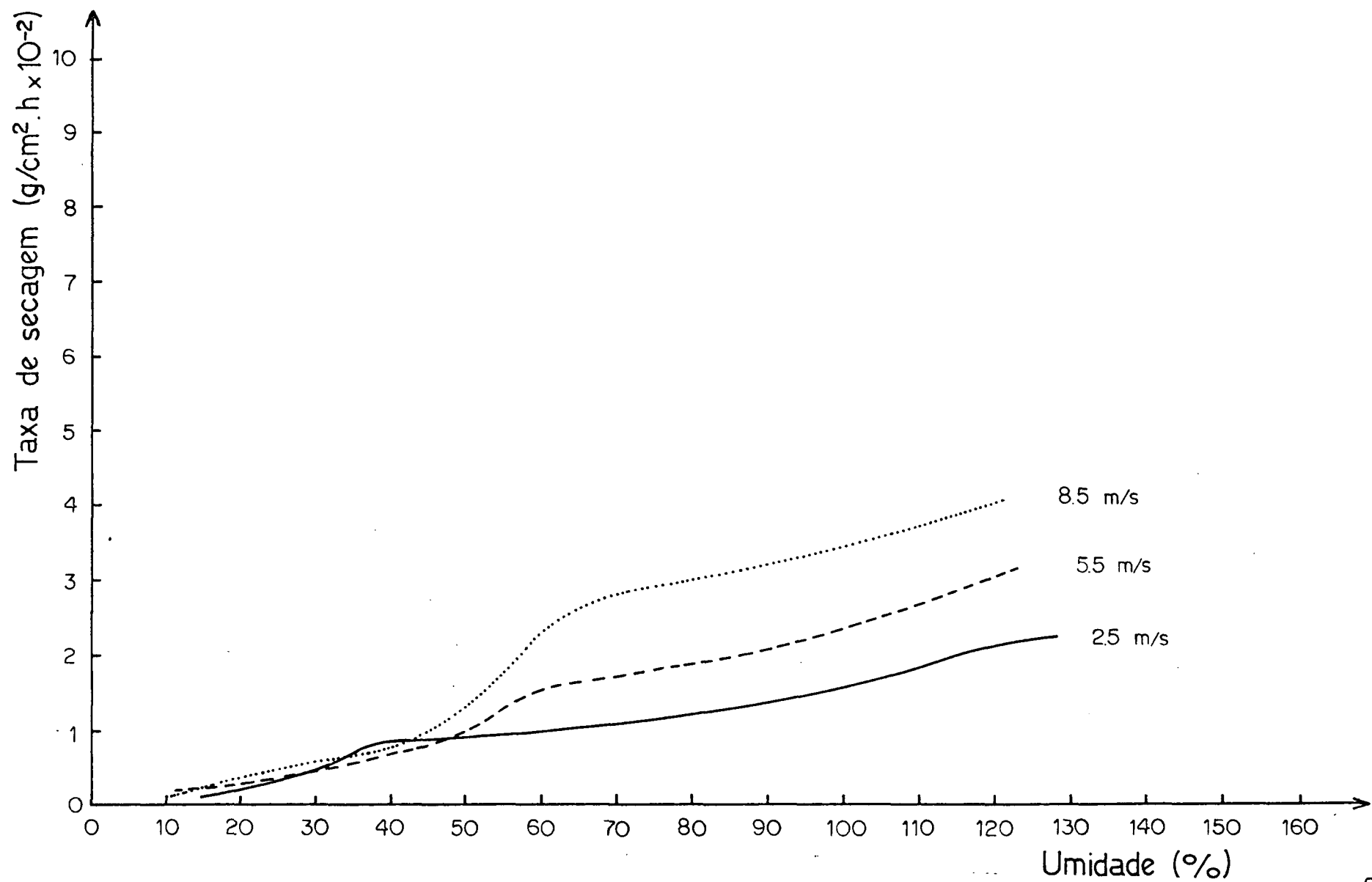


Figura 13 - Influência da Velocidade do Ar na Taxa de Secagem para Temperatura de 50°C. 19

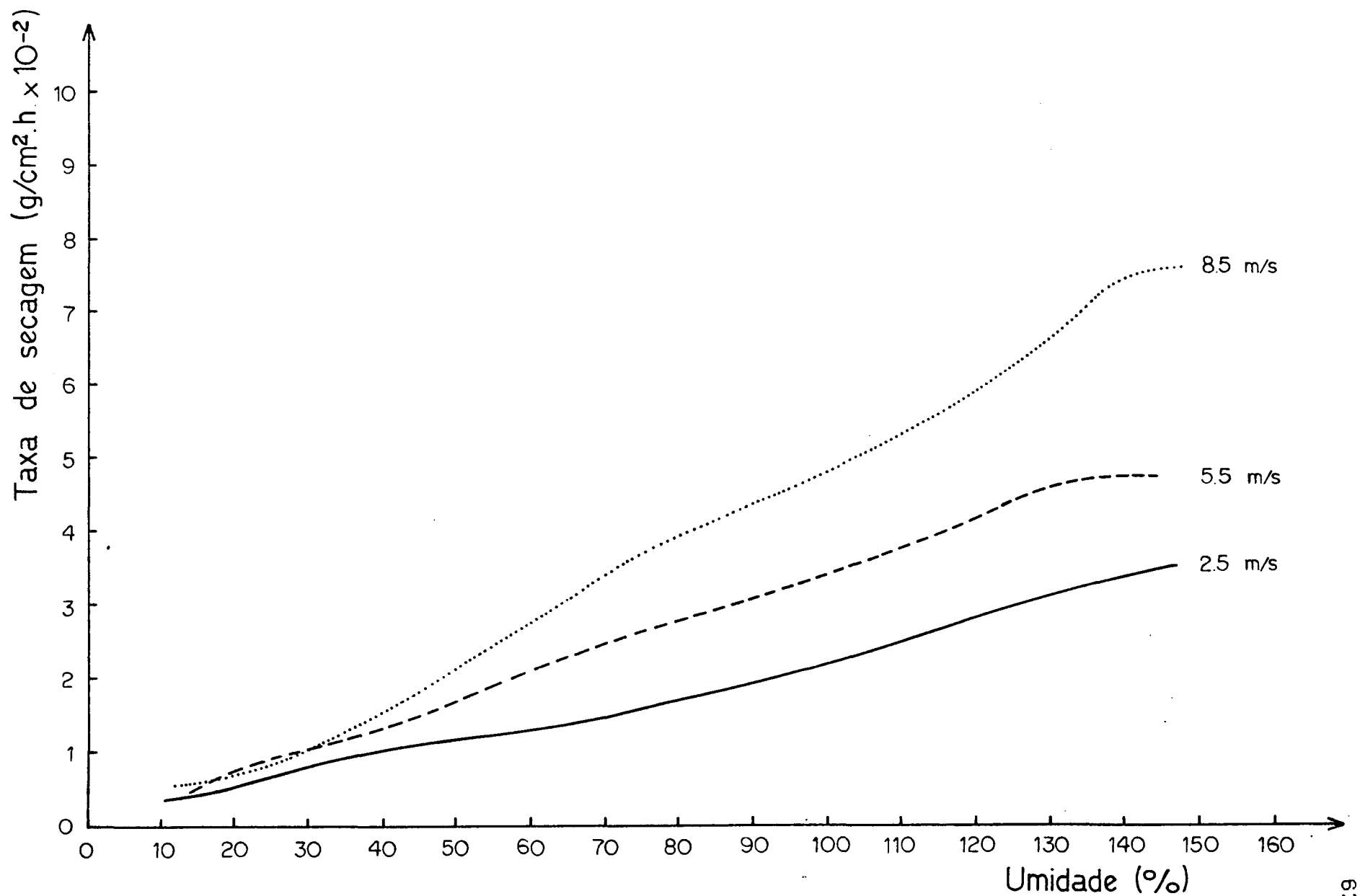


Figura 14 - Influência da Velocidade do Ar na Taxa de Secagem para Temperatura de 80°C.

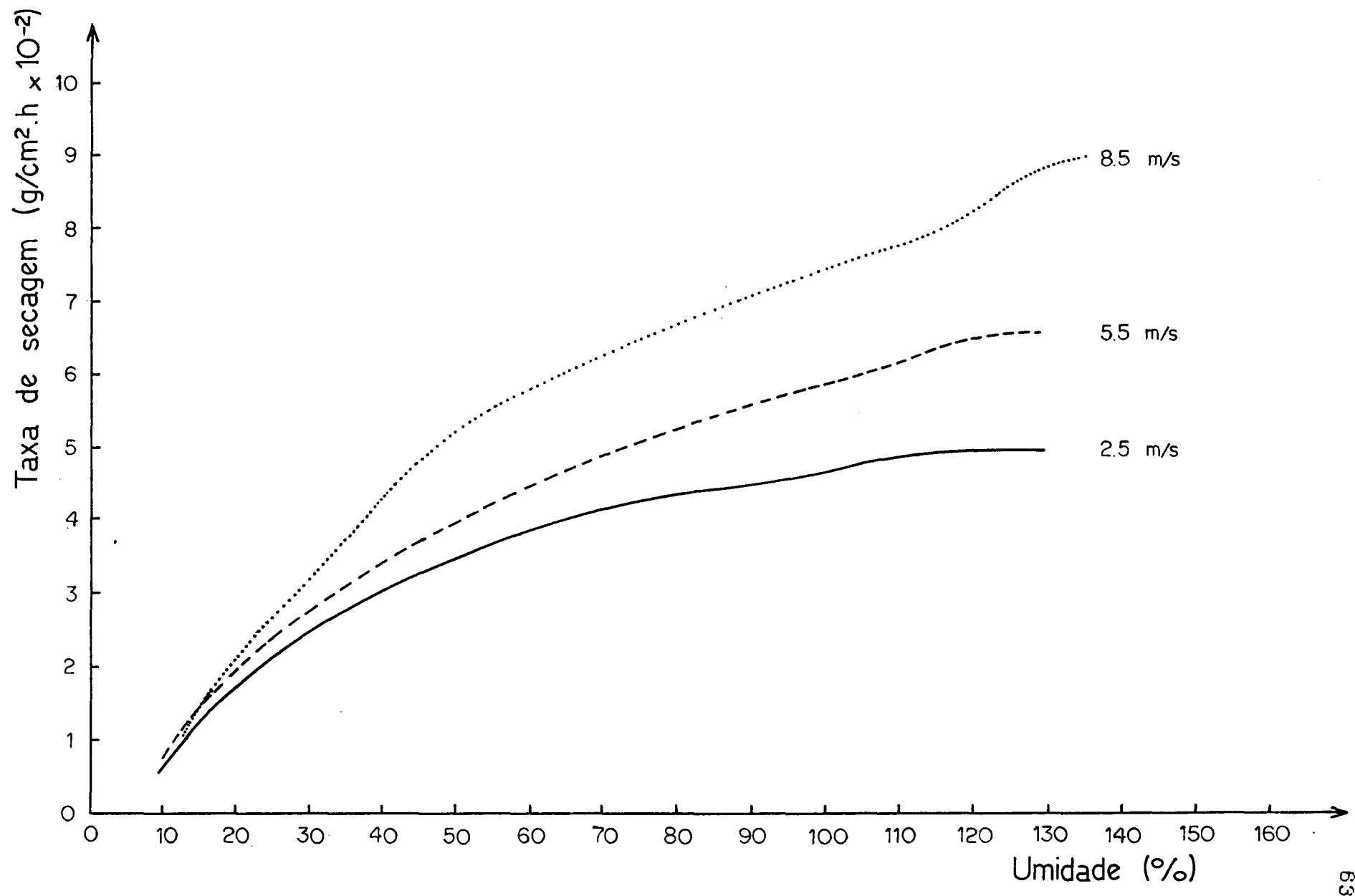


Figura 15 - Influência da Velocidade do Ar na Taxa de Secagem para Temperatura de 110°C.

#### 4.5. Consumo de Energia

##### 4.5.1. Consumo de Energia em Estufa Piloto

O consumo de energia em estufa piloto foi obtido por medidores de consumo de energia em kWh. Estes aparelhos foram instalados nos sistemas de aquecimento, vaporização e ventilação da estufa. Os resultados obtidos em cada um destes sistemas acima mencionados, e o consumo total de energia para cada tratamento encontram-se na tabela 9.

A análise estatística dos dados presentes nesta tabela mostra que o fator temperatura é significativo na redução do consumo de energia nos intervalos de umidade de verde até 10%, verde até 30% e de 30% até 10% (vide anexo 2). As tabelas 10, 11 e 12 apresentam os resultados de um teste a posteriori (Duncan) para identificar quais as temperaturas que apresentam diferenças significativas entre si. Observa-se que no intervalo de umidade de verde até 10% obteve-se uma redução significativa quando comparou-se a secagem à alta temperatura (110°C) com a secagem convencional (50°C). Para KOCH<sup>21</sup>, este fato deve-se principalmente as baixas perdas de calor decorrente do menor tempo de secagem à alta temperatura.

TEMPERATURA (°C)	VELOCIDADE DO AR (m/s)	VERDE ATÉ 10%				VERDE ATÉ 30%				30% ATÉ 10%			
		C1	C2	C3	CT	C1	C2	C3	CT	C1	C2	C3	CT
50	2,5	221,7	18,5	38,0	278,0	168,3	0	16,9	185,0	53,4	18,5	21,1	93,0
	5,5	191,7	50,6	38,4	281,0	139,9	19,2	18,8	178,0	51,8	31,4	19,6	103,0
	8,5	168,8	66,5	37,8	273,0	128,3	32,3	18,6	179,0	40,5	34,5	19,2	94,0
80	2,5	158,6	72,7	13,6	245,0	129,7	50,0	8,9	188,5	28,9	24,0	4,7	57,0
	5,5	155,7	68,5	15,8	240,0	130,6	47,2	10,1	188,0	25,1	21,3	5,8	52,0
	8,5	147,5	58,3	15,3	221,0	120,1	40,7	8,8	169,5	27,4	17,6	6,5	51,5
110	2,5	157,3	38,0	7,7	205,0	31,9	26,7	5,0	163,5	27,4	11,3	2,7	41,5
	5,5	144,4	39,8	7,2	191,0	124,8	29,8	5,1	160,0	19,6	10,0	2,1	31,0
	8,5	135,5	28,1	6,9	170,5	117,7	22,7	3,6	144,0	17,8	5,4	3,3	26,5

C1 - CONSUMO DE ENERGIA PELO SISTEMA DE AQUECIMENTO (kWh)

C2 - CONSUMO DE ENERGIA PELO SISTEMA DE VAPORIZAÇÃO (kWh)

C3 - CONSUMO DE ENERGIA PELO SISTEMA DE VENTILAÇÃO (kWh)

CT - CONSUMO TOTAL DE ENERGIA (kWh)

Tabela 9 - Consumo de energia em kWh para o sistema de aquecimento, sistema de vaporização e sistema de ventilação.

TEMPERATURA X VELOCIDADE DO AR (°C) (m/s)	50(2,5)	50(5,5)	50(8,5)	80(2,5)	80(5,5)	80(8,5)	110(2,5)	110(5,5)	110(8,5)
50(2,5)	-								
50(5,5)	NS	-							
50(8,5)	NS	NS	-						
80(2,5)	NS	NS	NS	-					
80(5,5)	NS	NS	NS	NS	-				
80(8,5)	‡	‡	NS	NS	NS	-			
110(2,5)	‡‡	‡‡	‡	NS	NS	NS	-		
110(5,5)	‡‡	‡‡	‡‡	‡	NS	NS	NS	-	
110(8,5)	‡‡	‡‡	‡‡	‡‡	‡	‡	NS	NS	-

NS - NÃO SIGNIFICATIVO

‡ - SIGNIFICATIVO AO NÍVEL DE 95%

‡‡ - SIGNIFICATIVO AO NÍVEL DE 99%

Tabela 10 - Consumo de energia - Comparação de médias através do teste de Duncan - intervalo de umidade de verde até 10%.



TEMPERATURA X VELOCIDADE DO AR (°C) (m/s)	50(2,5)	50(5,5)	50(8,5)	80(2,5)	80(5,5)	80(8,5)	110(2,5)	110(5,5)	110(8,5)
50(2,5)	-								
50(5,5)	NS	-							
50(8,5)	NS	NS	-						
80(2,5)	NS	NS	NS	-					
80(5,5)	NS	NS	NS	NS	-				
80(8,5)	NS	NS	NS	NS	NS	-			
110(2,5)	NS	NS	NS	NS	NS	NS	-		
110(5,5)	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	-	
110(8,5)	‡	‡	‡	‡	‡	NS	NS	NS	-

NS - NÃO SIGNIFICATIVO

‡ - SIGNIFICATIVO AO NÍVEL DE 95%

Tabela 11 - Consumo de energia - Comparação de médias através do teste de Duncan, - intervalo de umidade de verde até 30%.

TEMPERATURA X VELOCIDADE DO AR (°C) (m/s)	50(2,5)	50(5,5)	50(8,5)	80(2,5)	80(5,5)	80(8,5)	110(2,5)	110(5,5)	110(8,5)
50(2,5)	-								
50(5,5)	NS	-							
50(8,5)	NS	NS	-						
80(2,5)	‡	‡‡	‡	-					
80(5,5)	‡	‡‡	‡	NS	-				
80(8,5)	‡	‡‡	‡	NS	NS	-			
110(2,5)	‡‡	‡‡	‡‡	NS	NS	NS	-		
110(5,5)	‡‡	‡‡	‡‡	NS	NS	NS	NS	-	
110(8,5)	‡‡	‡‡	‡‡	‡	NS	NS	NS	NS	-

NS - NÃO SIGNIFICATIVO

‡ - SIGNIFICATIVO AO NÍVEL DE 95%

‡‡ - SIGNIFICATIVO AO NÍVEL DE 99%

Tabela 12 - Consumo de energia - Comparação de médias através do teste de Duncan - intervalo de umidade de 30% até 10%.

O consumo total de energia no âmbito das temperaturas é mostrado na tabela 13, juntamente com a porcentagem que o sistema de aquecimento, vaporização e ventilação representam do consumo global de energia. Como pode ser observado nesta tabela, a maior parte do consumo de energia do processo de secagem é gasto pelo sistema de aquecimento, sendo que deste total a maior porcentagem é gasta no intervalo de umidade de verde até 30%. Este fato deve-se a grande quantidade de energia necessária para evaporar a água capilar removida da madeira.

Com relação ao consumo de energia do sistema de vaporização, observa-se que na temperatura de 50°C, houve uma maior porcentagem de consumo no intervalo de umidade de 30% até 10% que no intervalo de verde até 30%, enquanto que nas temperaturas de 80°C e 110°C ocorreu o contrário. Na realidade o que ocorreu na temperatura de 50°C durante o intervalo de umidade de verde até 30%, foi que a umidade relativa do ar atmosférico aliada a evaporação da umidade da madeira, fizeram com que poucas vezes fosse necessário o acionamento do sistema de vaporização para manter a umidade relativa programada, o mesmo não ocorreu no intervalo de umidade de 30% até 10%, pois com a redução da evaporação foi necessário que o sistema de vaporização fosse acionado mais vezes. No entanto, o emprego das temperaturas de 80°C e 110°C no intervalo de umidade de verde até 30%, fez com que

aumentasse significativamente a evaporação de umidade, obrigando o sistema de controle das chaminés a ser acionado seguidamente para realizar a troca de ar úmido por ar seco. Entretanto, ocorreu que o sistema de controle da estufa, que envia o sinal para o fechamento das entradas e saídas de ar, estava realizando esta operação com uma certa lentidão, permitindo que a umidade relativa fosse reduzida para valores abaixo do programado, com isto o sistema de vaporização era acionado. Já no intervalo de umidade de 30% até 10% como houve uma redução da evaporação de umidade, este problema foi menos pronunciado.

Observe ainda nesta tabela, que o consumo de energia do sistema de ventilação na temperatura de 50°C, é maior no intervalo de umidade de 30% até 10%; enquanto que nas temperaturas de 80°C e 110°C, este consumo é maior no intervalo de verde até 30%. Neste caso, a razão da inversão está diretamente relacionada com o tempo de secagem obtido nestes intervalos de umidade, uma vez que o consumo de energia do sistema de ventilação é constante durante o processo de secagem.

Com base nos resultados da tabela 12, observa-se ainda que, na secagem convencional (50°C e 80°C) o consumo de energia necessária aos sistemas de aquecimento, vaporização e ventilação correspondem respectivamente a 68%, 22% e 10% do consumo total de energia do processo; enquanto que na

secagem à alta temperatura (110°C), este consumo de energia corresponde a 77%, 19% e 4% do consumo total.

Resultados obtidos por KOCH<sup>21</sup>, mostram que na secagem convencional, o consumo de energia destes sistemas correspondem respectivamente a 66%, 24% e 10% do consumo total; enquanto que na secagem à alta temperatura, este consumo corresponde a 81%, 10% e 9% do consumo total.

TEMPERATURA (°C)	PONTOS DE CONSUMO DE ENERGIA	VERDE ATÉ 10% CONSUMO DE ENERGIA (kwh)	PORCENTAGEM DO CONSUMO (%)	VERDE ATÉ 30% CONSUMO DE ENERGIA (kwh)	PORCENTAGEM DO CONSUMO (%)	30% ATÉ 10% CONSUMO DE ENERGIA (kwh)	PORCENTAGEM DO CONSUMO (%)	RELAÇÃO ENTRE CONSUMO DE VERDE ATÉ 30% E VERDE ATÉ 10%	RELAÇÃO ENTRE CONSUMO DE 30% ATÉ 10% E VERDE ATÉ 10%
50	AQUECIMENTO	194,0	70	146,0	81	48,6	50	75	25
	VAPORIZAÇÃO	45,0	16	17,0	9	28,1	29	38	62
	VENTILAÇÃO	38,0	14	18,0	10	20,0	21	47	53
	CONS.TOTAL DE ENERGIA	277,0	100	181,0	100	96,7	100	65	35
80	AQUECIMENTO	154,0	66	126,5	70	27,1	50	82	18
	VAPORIZAÇÃO	66,0	28	46,0	25	21,0	39	70	30
	VENTILAÇÃO	15,0	6	9,5	5	5,7	11	63	37
	CONS.TOTAL DE ENERGIA	235,0	100	182,0	100	53,8	100	78	22
110	AQUECIMENTO	145,0	77	124,8	80	21,6	65	85	15
	VAPORIZAÇÃO	35,5	19	26,4	17	8,7	27	74	26
	VENTILAÇÃO	7,5	4	4,6	3	2,7	8	61	39
	CONS.TOTAL DE ENERGIA	188,0	100	155,8	100	33,0	100	82	18

Tabela 13 - Consumo médio de energia para as temperaturas e porcentagem de consumo.

Uma análise do consumo de energia obtidos em cada tratamento, em termos de energia consumida por kilograma de água evaporada nos intervalos de umidade de verde até 10%, verde até 30% e 30% até 10% são mostrados nas tabelas 14, 15 e 16. Observe que o consumo de energia obtidos para secagem de verde até 10% esta dentro dos limites de 2 a 4 kWh por kilograma de água evaporada obtidos por KEYLWERTH<sup>18</sup> na secagem convencional, e um pouco superiores ao limite de 1,2 a 1,5 kWh por kilograma de água evaporada obtido na secagem à alta temperatura. A razão desta diferença de resultados obtidos para secagem à alta temperatura, deve-se provavelmente ao pequeno volume de madeira utilizado neste experimento.

Observa-se ainda nestas tabelas que no âmbito da secagem de verde até 10%, a secagem à alta temperatura (110°C), propiciou uma redução no consumo de energia na ordem de 35% em relação a secagem convencional de 50°C, e cerca de 25% em relação a secagem convencional de 80°C. Resultados obtidos por KEYLWERTH<sup>18</sup>, KININMONTH, MILLER e RILEY<sup>19</sup> e TOMASELLI<sup>42</sup>, demonstram que o emprego da secagem à alta temperatura, reduz em média 30% o consumo de energia quando comparado com a secagem convencional. No âmbito da secagem de verde até 30%, o emprego da secagem à alta temperatura 110°C, proporcionou uma redução no consumo de energia de 15% em relação a secagem convencional de 50°C e

80°C; no entanto, no âmbito de 30% até 10%, o emprego da secagem à alta temperatura (110°C), reduziu cerca de 65% e 35% respectivamente o consumo de energia em relação a secagem convencional de 50°C e 80°C. Estas reduções no consumo de energia, obtidas neste intervalo de umidade, deve-se ao efeito da temperatura no movimento de umidade e difusão.



TEMPERATURA (°C)	VELOCIDADE DO AR (m/s)	UMIDADE			TEMPO DE SECAGEM (h)	ENERGIA CONSUMIDA		MÉDIA kwh/kgH <sub>2</sub> O
		INICIAL(%)	FINAL(%)	ÁGUA EVAPORADA(kg)		kw/h	kwh/kgH <sub>2</sub> O	
50	2,5	187,0	10	88,0	69,0	4,0	3,2	3,1
	5,5	180,5	10	90,0	63,5	4,4	3,1	
	8,5	182,5	10	89,5	59,5	4,6	3,1	
80	2,5	171,5	10	83,0	30,0	8,2	3,0	2,7
	5,5	180,3	10	88,5	26,5	9,1	2,7	
	8,5	185,0	10	88,0	23,5	9,4	2,5	
110	2,5	189,5	10	89,5	17,0	12,1	2,3	2,0
	5,5	165,5	10	86,5	13,5	14,1	2,1	
	8,5	195,0	10	92,5	10,5	16,2	1,8	

Tabela 14 - Consumo de Energia por hora de operação e por kilograma de água evaporada no intervalo de umidade de verde até 10%.

TEMPERATURA (°C)	VELOCIDADE DO AR (m/s)	UMIDADE			TEMPO DE SECAGEM (h)	ENERGIA CONSUMIDA		MÉDIA kwh/kgH <sub>2</sub> O
		INICIAL(%)	FINAL(%)	ÁGUA EVAPORADA(kg)		kw/h	kwh/kgH <sub>2</sub> O	
50	2,5	187,0	30	78,0	32,0	5,8	2,4	2,5
	5,5	180,5	30	79,5	28,0	6,4	2,2	
	8,5	182,5	30	79,0	27,0	6,6	2,2	
80	2,5	171,5	30	73,0	19,0	9,9	2,6	2,4
	5,5	180,3	30	78,0	16,0	11,8	2,4	
	8,5	185,0	30	78,0	13,5	12,5	2,2	
110	2,5	189,5	30	79,5	13,0	12,6	2,1	2,0
	5,5	165,5	30	75,5	10,0	16,0	2,1	
	8,5	195,0	30	82,5	7,5	19,2	1,7	

Tabela 15 - Consumo de Energia por hora de operação e por quilograma de água evaporada no intervalo de umidade de verde até 30%.

TEMPERATURA (°C)	VELOCIDADE DO AR (m/s)	UMIDADE			TEMPO DE SECAGEM (h)	ENERGIA CONSUMIDA		MÉDIA kwh/kgH <sub>2</sub> O
		INICIAL(%)	FINAL(%)	ÁGUA EVAPORADA(kg)		kwh/h	kwh/kgH <sub>2</sub> O	
50	2,5	30	10	9,9	37,0	2,5	9,4	9,4
	5,5	30	10	10,5	36,0	2,9	9,8	
	8,5	30	10	10,4	32,5	2,9	9,0	
80	2,5	30	10	10,3	10,5	5,4	5,6	5,2
	5,5	30	10	10,4	10,0	5,1	5,0	
	8,5	30	10	10,1	10,5	5,0	5,1	
110	2,5	30	10	10,0	3,9	10,6	4,2	3,3
	5,5	30	10	11,1	3,9	8,2	2,9	
	8,5	30	10	10,0	3,4	7,8	2,7	

Tabela 16 - Consumo de Energia por hora de operação e por kilograma de água evaporada no intervalo de umidade de 30% até 10%.

#### 4.5.2. Consumo Teórico de Energia

O consumo teórico de energia apresentado neste estudo foi calculado tomando-se como base o procedimento apresentado no anexo 1, visando avaliar a relação existente entre o consumo teórico e o consumo efetivo obtido em estufa piloto.

Os resultados obtidos nos diversos pontos de consumo de energia em uma estufa de secagem, são mostrados nas tabelas 17, 18 e 19 para os intervalos de umidade de verde até 10%, verde até 30% e 30% até 10% respectivamente.

Como pode ser observado nestas tabelas, os resultados teóricos apresentam a mesma tendência dos resultados obtidos em estufa piloto, ou seja, de uma maneira geral houve uma redução no consumo de energia com o aumento da temperatura. Em termos de totais de energia consumida, observa-se que no âmbito da secagem de verde até 10%, o emprego da secagem à alta temperatura (110°C) propiciou uma redução na ordem de 25% em relação a secagem convencional (50°C e 80°C). No âmbito da secagem de verde até 30% e 30% até 10% o emprego da secagem à alta temperatura (110°C), proporcionou uma redução média no consumo de energia de aproximadamente 10% e 55% respectivamente em relação a secagem convencional (50°C e 80°C). Neste caso, pode-se

verificar que a redução no consumo de energia, no intervalo de umidade de verde até 30%, deve-se unicamente à menor troca de ar úmido por ar seco, resultante da maior capacidade do ar de absorver umidade na temperatura de 110°C; enquanto que no intervalo de 30% até 10%, houve um segundo fator, que foi a redução das perdas de energia durante o processo de secagem, resultante do menor tempo de secagem.

PONTOS DE CONSUMO DE ENERGIA EM UMA ESTUFA DE SECAGEM	TEMPERATURA DE SECAGEM								
	50°C			80°C			110°C		
	2,5m/s	5,5m/s	8,5m/s	2,5m/s	5,5m/s	8,5m/s	2,5m/s	5,5m/s	8,5m/s
ENERGIA NECESSÁRIA PARA AQUECER AS PAREDES E PORTA DA ESTUFA	6,2	6,3	6,2	11,1	11,1	11,1	15,8	15,8	15,8
ENERGIA NECESSÁRIA PARA AQUECER A ÁGUA DA MADEIRA	4,3	4,4	4,4	7,2	7,6	7,6	11,0	10,7	11,3
ENERGIA NECESSÁRIA PARA AQUECER A MADEIRA	0,62	0,65	0,65	1,1	1,1	1,1	1,5	1,7	1,5
ENERGIA NECESSÁRIA PARA AQUECER O AR INTERNO DA ESTUFA	0,06	0,06	0,06	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
ENERGIA NECESSÁRIA PARA AQUECER OS SEPARADORES	0,12	0,12	0,12	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3
ENERGIA NECESSÁRIA PARA EVAPO- RAR A ÁGUA DA MADEIRA	58,2	60,0	59,2	53,4	56,8	56,5	55,4	53,4	57,2
ENERGIA NECESSÁRIA PARA AQUECER O AR DE RENOVACÃO	32,7	31,2	31,4	9,6	10,0	10,0	1,9	2,0	1,9
ENERGIA NECESSÁRIA PARA COMPEN- SAR AS PERDAS	57,2	49,5	43,0	40,8	35,8	32,3	32,7	28,2	20,6
TOTAL DE ENERGIA NECESSÁRIA A SECAGEM DA MADEIRA	159,0	152,0	145,0	124,0	123,0	119,0	119,0	112,0	109,0

Tabela 17 - Consumo Teórico de Energia no intervalo de umidade de verde até 10%. (kWh)

PONTOS DE CONSUMO DE ENERGIA EM UMA ESTUFA DE SECAGEM	TEMPERATURA DE SECAGEM								
	50°C			80°C			110°C		
	2,5m/s	5,5m/s	8,5m/s	2,5m/s	5,5m/s	8,5m/s	2,5m/s	5,5m/s	8,5m/s
ENERGIA NECESSÁRIA PARA AQUECER AS PAREDES E PORTA DA ESTUFA	6,2	6,3	6,2	11,1	11,1	11,1	15,8	15,8	15,8
ENERGIA NECESSÁRIA PARA AQUECER A ÁGUA DA MADEIRA	4,3	4,4	4,4	7,2	7,6	7,6	11,0	10,7	11,3
ENERGIA NECESSÁRIA PARA AQUECER A MADEIRA	0,6	0,7	0,6	1,1	1,1	1,1	1,5	1,7	1,5
ENERGIA NECESSÁRIA PARA AQUECER O AR INTERNO DA ESTUFA	0,06	0,06	0,06	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
ENERGIA NECESSÁRIA PARA AQUECER OS SEPARADORES	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3
ENERGIA NECESSÁRIA PARA EVAPO- RAR A ÁGUA DA MADEIRA	51,6	52,5	52,3	46,8	50,2	50,0	49,3	42,6	51,0
ENERGIA NECESSÁRIA PARA AQUECER O AR DE RENOVACÃO	29,0	27,5	27,7	8,4	8,8	8,9	1,7	1,8	1,7
ENERGIA NECESSÁRIA PARA COMPEN- SAR AS PERDAS	24,8	21,6	21,1	26,3	22,0	18,1	25,3	20,7	14,3
TOTAL DE ENERGIA NECESSÁRIA A SECAGEM DA MADEIRA	117,0	113,0	113,0	101,0	101,0	97,0	105,0	94,0	96,0

Tabela 18 - Consumo Teórico de Energia no intervalo de umidade de verde até 30%. (kWh)

PONTOS DE CONSUMO DE ENERGIA EM UMA ESTUFA DE SECAGEM	TEMPERATURA DE SECAGEM								
	50°C			80°C			110°C		
	2,5m/s	5,5m/s	8,5m/s	2,5m/s	5,5m/s	8,5m/s	2,5m/s	5,5m/s	8,5m/s
ENERGIA NECESSÁRIA PARA AQUECER AS PAREDES E PORTA DA ESTUFA	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ENERGIA NECESSÁRIA PARA AQUECER A ÁGUA DA MADEIRA	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ENERGIA NECESSÁRIA PARA AQUECER A MADEIRA	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ENERGIA NECESSÁRIA PARA AQUECER O AR INTERNO DA ESTUFA	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ENERGIA NECESSÁRIA PARA AQUECER OS SEPARADORES	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ENERGIA NECESSÁRIA PARA EVAPO- RAR A ÁGUA DA MADEIRA	6,6	7,0	6,9	6,6	6,7	6,5	6,2	6,8	6,2
ENERGIA NECESSÁRIA PARA AQUECER O AR DE RENOVACÃO	3,7	3,7	3,7	1,2	1,2	1,1	0,2	0,3	0,2
ENERGIA NECESSÁRIA PARA COMPEN- SAR AS PERDAS	32,4	27,8	21,9	14,5	13,8	14,1	7,5	7,5	6,4
TOTAL DE ENERGIA NECESSÁRIA A SECAGEM DA MADEIRA	43,0	39,0	33,0	22,0	22,0	22,0	14,0	15,0	13,0

Tabela 19 - Consumo Teórico de Energia no intervalo de unidade de 30% até 10%. (kwh)



Uma síntese dos totais de energia consumida e a eficiência do consumo teórico de energia em relação ao consumo de energia obtido em estufa piloto, é mostrado na tabela 20. Observa-se nesta tabela, que a eficiência média entre os tratamentos foi de aproximadamente de 80%; no entanto, há de se considerar dois tipos de perdas de energia ocorrida durante a secagem em estufa piloto, e que não estão computados neste total: a primeira é relacionada com o equipamento de secagem, que não apresenta uma boa vedação no sistema de ventilação(chaminés); e a segunda foi decorrente da abertura da estufa em intervalos regulares, para pesagem das amostras testes. Portanto, acredita-se que os resultados obtidos com a aplicação desta metodologia para determinação do consumo teórico de energia, esteja mais próximo dos resultados obtidos em estufa piloto. Estes resultados são considerados muito bons comparados aos resultados de KININMONTH, MILLER e RILEY<sup>18</sup>, que alcançaram uma eficiência entre consumo teórico e prático de 65% na secagem convencional e 67% na secagem à alta temperatura. Uma melhor visualização da relação existente entre consumo teórico e prático é mostrado na figura 16.

TEMPERATURA (°C)	VELOCID. DO AR (m/s)	VERDE ATÉ 10%			VERDE ATÉ 30%			30% ATÉ 10%		
		CONSUMO PRÁTICO (kwh)	CONSUMO TEÓRICO (kwh)	RELACÃO Ct/Cp.100 (%)	CONSUMO PRÁTICO (kwh)	CONSUMO TEÓRICO (kwh)	RELACÃO Ct/Cp.100 (%)	CONSUMO PRÁTICO (kwh)	CONSUMO TEÓRICO (kwh)	RELACÃO Ct/Cp.100 (%)
50	2,5	221,7	159,0	71,7	168,3	117,0	69,5	53,4	43,0	80,5
	5,5	191,7	152,0	79,3	139,9	113,0	80,8	51,8	39,0	75,3
	8,5	168,8	145,0	85,9	128,3	113,0	88,1	40,5	33,0	81,5
80	2,5	158,6	124,0	78,2	129,7	101,0	77,9	28,9	22,0	76,1
	5,5	155,7	123,0	78,9	130,6	101,0	77,3	25,0	22,0	87,8
	8,5	147,5	119,0	80,7	120,1	97,0	80,8	27,4	22,0	80,2
110	2,5	157,3	119,0	75,7	131,9	105,0	79,6	27,4	14,0	51,1
	5,5	144,4	112,0	77,6	124,8	94,0	75,3	19,6	15,0	76,5
	8,5	135,5	109,0	80,4	117,7	96,0	81,6	17,8	13,0	73,0

Ct/Cp - RELAÇÃO ENTRE CONSUMO TEÓRICO E PRÁTICO

Tabela 20 - Relação entre consumo teórico e consumo obtido em estufa piloto.

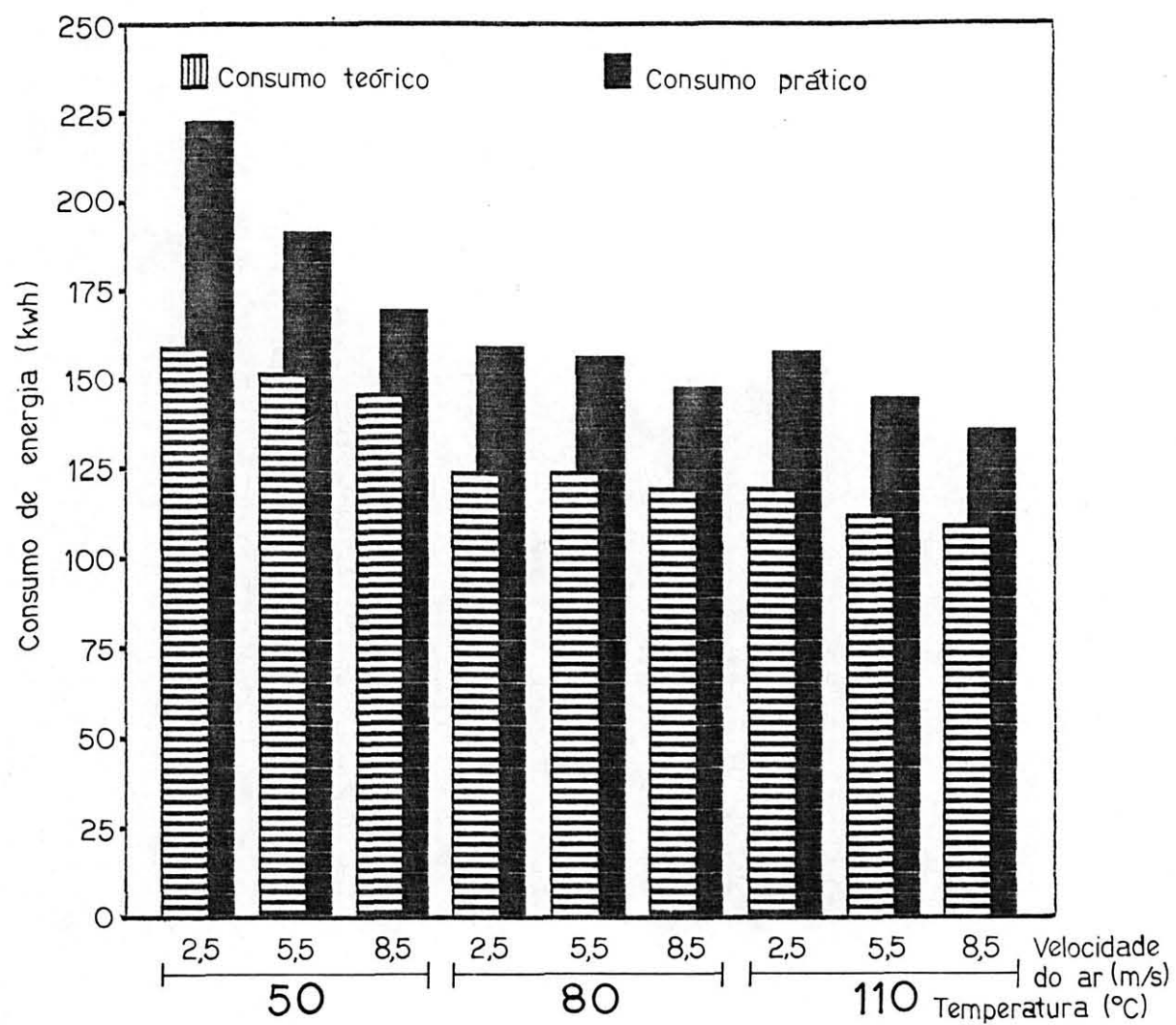


Figura 16 - Comparação entre consumo teórico e consumo obtido em estufa piloto.

## 5- CONCLUSOES E RECOMENDAÇÕES

Com base nos resultados e discussão apresentados neste estudo, pode-se concluir:

a - Como esperado, a taxa de secagem aumentou significativamente com o aumento da temperatura, independentemente da velocidade do ar empregada.

b - Maiores velocidades do ar induzem a um aumento na taxa de secagem. No entanto o acréscimo causado pela velocidade do ar para temperatura de 50°C não foi estatisticamente significativo nas faixas de umidade utilizadas.

c - Para temperatura de 80°C, o efeito da velocidade do ar somente é sentido na fase inicial da secagem (verde até 30%). Nesta fase observa-se que a velocidade do ar de 8,5 m/s aumenta significativamente a taxa de secagem em comparação com as demais velocidades do ar utilizadas.

d - Para temperatura de 110°C o efeito da velocidade do ar demonstrou ser mais acentuado, pois qualquer aumento na velocidade do ar durante a fase inicial da secagem (verde até 30%) foi significativo. No entanto, o mesmo não ocorreu na fase final da secagem (30% até 10%), onde somente altas

velocidades do ar (8,5 m/s) trouxeram aumentos significativos na taxa de secagem.

e - O aumento na temperatura de 50°C para 110°C, causou uma redução de 30% no consumo de energia. Em termos de energia consumida por kilograma de água evaporada, a secagem à alta temperatura (110°C), requer aproximadamente 2,0 kWh por kilograma de água evaporada, enquanto que a secagem convencional (50°C e 80°C), requer cerca 3,0 kWh por kilograma de água evaporada..

f - A variação da velocidade do ar embora tenha reduzido o tempo de secagem não afetou significativamente o consumo de energia. Atribui-se este fato ao baixo consumo de energia do sistema de ventilação em relação ao consumo total de energia da secagem.

g - O consumo de energia calculado teóricamente representou em média 80% do consumo efetivo obtido em estufa Piloto. Estes resultados são considerados satisfatórios quando comparados com outros estudos.

h - A presença de defeitos de secagem como encanoamento, empenamentos, escurecimento superficial, e mancha marrom foram detectados quando empregou-se as temperaturas de 80°C e 110°C. Convém salientar no entanto, que a não ser pela

presença da mancha marrom, os demais defeitos foram removidos com um aplainamento de aproximadamente 1 mm. Para remoção da mancha marrom da madeira foi necessário aplainar de 2mm a 4mm de uma das faces da madeira. Nos casos em que se requer madeira isenta deste tipo de defeito, é necessário utilizar temperatura de 50°C.

Os resultados apresentados no presente estudo, permitem as seguintes sugestões :

a - Como o presente estudo não considerou o efeito da variação da umidade relativa na secagem, recomenda-se que novos estudos sejam realizados visando-se avaliar o efeito da umidade relativa no tempo de secagem, taxa de secagem e consumo de energia.

b - Recomenda-se que na secagem a 80°C, seja utilizado alta velocidade do ar (8,5 m/s) na fase inicial da secagem, com redução para 2,5 m/s na fase final (30% até 10%), obtendo-se assim uma redução no consumo de energia do sistema de ventilação.

d - Para secagem à alta temperatura (110°C), recomenda-se o uso de altas velocidades do ar (8,5m/s) na fase inicial da secagem (verde até 30%), podendo ser esta velocidade

reduzida para aproximadamente 5,0m/s na fase final. (30% até 10%)

## SUMMARY

Wood samples of Pinus elliottii with the following dimensions: 800mm long, 25mm thickness and variable width, were submitted to drying in an experimental kiln under the temperatures of 50°C; 80°C and 110°C, using three air speeds, for each temperature kept up in all the treatments the humidity and volume of wood was the same.

The rise in the drying temperature increased considerably the rate of drying. Inside of the temperature of 80°C, the applying of higher air speed like 8,5 m/s, brought significant results during the beginning drying phase, however considering the temperature of 110°C, either increase of the air speed in this phase of drying was significant.

The applying of the temperatures 80°C and 110°C, caused the appearing of brown stain in the wood, some twist and cup in the wood, besides a surface darkening that proved to be more intense with the increase in the air speed in these temperatures. however it's important to notice that although the presence of a brown stain the other defects were removed with the dressing approximately of 1 mm. For remove the brown stain it was necessary to remove from 2 mm to 4 mm one face of the wood.



The energy consumption obtained from the drying at high temperatures ( $110^{\circ}\text{C}$ ), proved to be around 30% smaller than the consumption with the conventional drying ( $50^{\circ}\text{C}$  to  $80^{\circ}\text{C}$ ). It's believed that this reduction, is due to a greater efficiency in the heat transfer to the material surface, obtained with the use of high temperature drying.

The results obtained with the methodology applied to estimate the theoretical energy consumption, presented an average efficiency of 80% when compared with the results obtained in an experimental kiln. These results are considered good when compared to other researchers' results.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- 1- BRAMHAL, G. e WELLWOOD, R.W. Kiln drying of Western Canadian Lumber. Canadian Forest Service Information Report, (VP-X-156): 1-111, 1976. 112p.
- 2- BROWN, N.C. e BETHEL, J.S. La Industria Maderera. México, Wiley, 1965. 397p.
- 3- \_\_\_\_\_. , PANSHIN, A.J. e FORSAITH, C.C. Textbook of wood technology. London. McGraw-Hill, 1952. v.2. 783p.
- 4- CECH, M.Y. e PFAFF, F. Kiln operator's manual of Eastern Canada. Ontario, Eastern For. Prod., Lab., 1977. 189p.
- 5- CHRISTENSEN, F.J. Drying of young plantation pine for building purposes. CSIRO For. Prod. Newsletter. No. 368:1-3, 1969.
- 6- COMSTOCK, G.L. Energy requeriments for drying of wood products. Madison, Proceedings Wood Residue as an Energy Source, For. Prod. Res. Soc., 1975.
- 7- \_\_\_\_\_. Directional permeability of softwoods. Wood and Fiber, 1(4):283-89, 1970.
- 8- \_\_\_\_\_. e COTE, W.A. Factors affecting permeability and pit aspiration in coniferous sapwood. Wood Science Techn., 2(4):279-91, 1988.
- 9- ECKELMAN, C.A. e BAKER, J.L. Heat and air requirements in the kiln drying of wood. West Lafayette. Purdue University, Agric. Exp. Station Res. Bulletin, n.933, 1976. 19p.
- 10- GALVAO, A.P.M. e JANKOWSKY, J.P. Secagem Racional da Madeira. São Paulo, Nobel, 1985. 112p.
- 11- HANN, R.A. An investigation of drying of wood at temperatures above 100 Degrees Centigrade. The University of North Carolina. Ph.D Thesis, 203 p.
- 12- HATTON, T.A. Energy requeriments for the drying of wood -a theorctical treatment. South African. Council for Scientific and Industrial Research - Special Report Hout 54. P.O. Box 395, Pretoria. 1973.

- 13- HANS, P.S. Effect of Kiln Air Velocity, at Various Moisture Content Levels, on Drying Rate of 4/4 Yellow-Poplar Sapwood. Forest Prod. J. 24(4):45-47. 1974.
- 14- HART, C.A. The Drying of Wood. N.C. State Univ. Sch. For. Tech. Rep., 27, 1965. 24p.
- 15- \_\_\_\_\_. The Drying of Wood. The North Carolina Agricultural Extension Service. 1975. 36p. Revision.
- 16- HILDEBRAND, R. El secado da madeira serrada. Espanha, Comercial Sagera S.A., 1964. 159p.
- 17- \_\_\_\_\_. Kiln drying of sawn timber. Germany, R.H. Maschinembau GmbH, 1970. 204p.
- 18- KEYLWERTH, R. High - temperature drying installations. Holz als Roh-und Werkstoff. 10(14):134-138. 1952.
- 19- KININMONTH, J.A. MILLER e RILEY, S. Energy consumption in wood drying. Wood drying papers present at the IUFRO DIVISION V conference - Oxford - England. Forest Research Institute. New Zealand Forest Service. 1980.
- 20- KOCH, P. Utilization of the southern pines: Dep. of Agric. Forest Service. Agric. Handbook no. 420, 2v., 1972. 1663p.
- 21- \_\_\_\_\_. Process for Straightening And Drying Southern Pine 2 by 4's in 24 Hours. For. Prod. J. 21(5): 17-24, 1971.
- 22- KOLLMANN, F.F.P. Tecnologia de la Madeira y sus Aplicaciones. 2 ed. Madrid, Ministério da Agric., Instituto Florestal de Investigaciones, Experiências, 1959. v.1. 675p.
- 23- KOLLMANN, F.F.P. e COTE JR., W.A. Principles of Wood Science and Technology. Berlin, Springer Verlag, 1968. v.1, 528p.
- 24- KOLLMANN, F.F.P. e SCHNEIDER, A. Der einflub der stromungsgeschwindigkeit auf die heibdampftrocknung von shnittholz. Holz als Roh-und Werkstoff. 19: 461-478. 1961.
- 25- MACKAY, J.F.G. The influence of drying conditions and other factors on twist and torque in Pinus radiata studs. Wood and Fiber 4(4): 264-271. 1973.

- 26- MENDES, A.S. Dimensionamento de Secadores Convencionais para Madeiras. Manaus, CPPF - Centro de Pesquisas de Produtos Florestais, INPA-CNPq-SEPLAN/AM, 1984. 17p.
- 27- PONCE, R.H. e WATAI, L.T. Manual de Secagem da Madeira. São Paulo, IPT-Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, Ministério da Indústria e do Comércio, Secretaria de Tecnologia Industrial, 1985. 70p.
- 28- RASMUSSEN, E.F. Dry Kiln Operators Manual. Washington, Departement of Agricultura, Forest Service Forest Products Laboratory (Forest Service Handbook, 188), 1961. 197p.
- 29- ROSEN, H.N. High - Temperature Initial Drying of Wood: Potencial for Energy Recovery. For. Prod. J., 30(1): 29-34. 1980.
- 30- SALAMON, M. e MCLNTYRE, S. Manipulation of Air Velocity Permits Drying Time Savings. Canadian Forest Industries, .....: 49-57, 1969.
- 31- SANTINI, E.J. Influência da Temperatura na Taxa de Secagem e Contração da Madeira de Pinus Elliotti proveniente de plantios de rápido crescimento. Curitiba, FUPF, Série Técnica, 1980. 16p.
- 32- SCHNEIDER, A. e WAGNER, L. On the Influence of Flow Velocity on High-Temperature Drying of Lumber. Springer-Verlag. Holz als Roh-und Werkstoff 41: 455-458. 1983.
- 33- SHOTTAFFER, J.E. e SHULER, C.E. Estimating heat consumption in kiln drying lumber. Technical Bulletin 73. University of Maine, Orono. 1974. 24p.
- 34- SIAU, J.F. Flow in Wood. New York, Syracuse University. Press, 1971. 131p.
- 35- SIMPSON, W.T. Drying Wood: A Review. Forest Products Laboratory. USDA Forest Service. Madison, WI 53705 1984. 34p.
- 36- SKAAR, C. Water in wood. New York, Syracuse University Press, 1972. 218p.
- 37- \_\_\_\_\_. Effect of high temperature on the rate of degradation and reduction of hygroscopicity of wood. In: Res-conf. on High Temperature Drying Effects on

- Mechanical Properties of Soft Wood Lumber. USDA  
F.P.L. Madison, Wisc. Proceedings. 1976.
- 38- STAMM, A.J. Wood and Cellulose Science. New York,  
Ronald Press, 1964. 549p.
- 39- TAYLOR, F.W. e MITCHELL, P.H. Drying Pine Lumber at  
Very High Temperatures and Air Velocities.  
Mississippi State, MS 39762. Wood and Fiber Science  
19(3): 239-245. 1987.
- 40- TOMASELLI, I. The influence of high-temperature drying  
on some Physical and Mechanical Properties of Pinus  
radiata. D. Don. Melbourne, University of Melbourne  
Faculty of Agriculture and Forestry, 1977. 264p.  
(Tese de Doutorado).
- 41- \_\_\_\_\_. Novas técnicas de secagem de madeiras.  
Curitiba, STC-Engenharia /UFP. 22p.
- 42- \_\_\_\_\_. Aspectos físicos da secagem da madeira de  
Pinus elliotti Engelm acima de 100°C. Curitiba,  
Universidade Federal do Paraná - Departamento de Eng.  
e Tecnol. Rurais, 1981. 128p.
- 43- \_\_\_\_\_. e GROSSMAN, P.U.A. High Temperature Drying of  
Pinus radiata wood. Part I - Physical Aspects:  
drying rates and internal temperature of wood, 1980.
- 44- \_\_\_\_\_. Brown stain in Pinus elliottii timber.  
Papers presented at the wood drying party sessions  
IUFRO DIVISION 5 Meeting - São Paulo - Brazil. 1988.
- 45- TORGESON, O.W. Circulation of air in a lumber dry kiln:  
A Review. Forest Products Laboratory. For. Service  
U.S. Department of Agriculture, Madison, WI. No.1678  
1947. 6p.
- 46- \_\_\_\_\_. Lumber drying time - effect of air velocity.  
Lumberman 42 (12): 42-44. 1941a.
- 47- \_\_\_\_\_. Why the drying time of a kiln load of lumber  
is affected by air velocity. U.S.For.Serv. Report  
No. 1269. 1941b. 4p.
- 48- \_\_\_\_\_. Circulation of air in a lumber dry kiln.  
Forest Products Laboratory. U.S. Department of  
Agriculture Forest Service. Madison 5 Wisconsin,  
Report No. 1678, 1959. 6p.
- 49- VILLIERE, A. Séchage des Bois. Ed. Dunod, Paris,

1966. 410p.

## ANEXO 1

### PROCEDIMENTO PARA CALCULO DO CONSUMO TEORICO DE ENERGIA

## DEFINIÇÕES E SIMBOLOS USADOS

- $M_a$  - Massa do aço das paredes e portas da estufa (kg).
- $C_{ea}$  - Calor específico do aço (j/kg °C)
- $M_{is}$  - Massa de isolante térmico lã de vidro (kg).
- $C_{ei}$  - Calor específico do isolante térmico (j/kg °C).
- $T_b$  - Temperatura do termômetro de Bulbo Seco (°C).
- $T_a$  - Temperatura ambiente (°C).
- $M_{agua}$  - Massa d'água presente na carga de madeira a ser aquecida (kg).
- $C_{eagua}$  - Calor específico da água (j/kg °C).
- $M_{amad}$  - Massa seca da madeira (kg).
- $C_{amad}$  - Calor específico da madeira (j/kg °C).
- $M_{ar-seco}$  - Massa de ar presente no interior da estufa em condições ambientais (kg).
- $C_{e-ar-seco}$  - Calor específico do ar nas condições ambientais (j/kg °C).
- $M_{vap}$  - Massa de vapor presente na estufa em condições ambientais (kg).
- $C_{e-vap}$  - Calor específico do vapor (j/kg °C).
- $M_{sep}$  - Massa dos separadores (kg).
- $C_{lat}$  - Calor latente de vaporização para temperatura do Bulbo Seco (j/kg).
- $S_{exp}$  - Superfície total exposta da estufa (m<sup>2</sup>)



U - Coeficiente global de transferência de calor

(j/h.m<sup>2</sup>°C )

T - Tempo de secagem (h)

## PROCEDIMENTO PARA CALCULO DO CONSUMO TEORICO DE ENERGIA

- 1 - Energia necessária para aquecimento das paredes e porta da estufa ( $Q_1$ )

$$Q_1 = (M_a \times C_{ea} + M_{is} \times C_{ei}) \times (T_b - T_a)$$

- 2 - Energia necessária para aquecer a água da madeira ( $Q_2$ )

$$Q_2 = M_{agua} \times C_{eagua} \times (T_b - T_a)$$

- 3 - Energia necessária para aquecer a madeira ( $Q_3$ )

$$Q_3 = (M_{amad} + C_{amad}) \times (T_b - T_a)$$

- 4 - Energia necessária para aquecer o ar interno presente na estufa ( $Q_4$ )

$$Q_4 = (M_{ar-seco} \times C_{e-ar-seco} + M_{vap} \times C_{evap}) \times (T_b - T_a)$$

- 5 - Energia necessária para aquecer os sarrafos separadores ( $Q_5$ )

$$Q_5 = (M_{sep} \times C_{esep} + M_{agua} \times C_{eagua}) \times (T_b - T_a)$$

- 6 - Energia necessária para evaporar a água da madeira ( $Q_6$ )

$$Q_6 = C_{lat} \times M_{agua}$$

7 - Energia necessária para aquecer o ar de renovação (Q<sub>7</sub>)

$$Q_7 = (M_{ar-seco} \times C_{ar-seco} + M_{vap} \times C_{evap}) \times (T_b - T_a)$$

8 - Energia necessária para compensar perdas (Q<sub>8</sub>)

$$Q_8 = S_{exp} \times U \times T \times (T_b - T_a)$$

A N E X O 2

ANALISES DA VARIANCIA

## A1- TEOR DE UMIDADE INICIAL

C.V.	G.L.	S.Q	Q.M	F	
TOTAL	26	15915.6000			
TRATAMENTO	8	1920.3800	240.0470	0.31	NS
ERRO	18	13995.4000	777.5240		

NS - NÃO SIGNIFICATIVO

A2- TAXA DE SECAGEM - Intervalo de umidade de verde ate 30%.

C.V.	G.L	S.Q	Q.M	F	
TOTAL	26	98.7724			
TRATAMENTO	8	95.4118	11.9265	63.88	**
VELOC. DO AR	2	14.6708	7.3354	39.29	**
TEMPERATURA	2	72.6588	36.3294	194.58	**
INTERAÇÕES	4	8.0821	2.0205	10.82	**
ERRO	18	3.3607	0.1867		

\*\* - SIGNIFICATIVO AO NIVEL DE 99%

## A3- TAXA DE SECAGEM - Intervalo de umidade de verde ate 10%

C.V.	G.L	S.Q	Q.M	F	
TOTAL	26	90.7646			
TRATAMENTO	8	89.1767	11.1471	126.36	**
VELOC. DO AR	2	7.8905	3.9453	44.72	**
TEMPERATURA	2	77.2399	38.6200	437.79	**
INTERAÇÕES	4	4.0462	1.0116	11.47	**
ERRO	18	1.5879	0.0882		

\*\* - SIGNIFICATIVO AO NIVEL DE 99%

A4- TAXA DE SECAGEM - Intervalo de umidade de 30% ate 10%.

C.V.	G.L	S.Q	Q.M	F	
TOTAL	26	17.7341			
TRATAMENTO	8	17.4972	2.1872	166.21	**
VELOC. DO AR	2	0.1158	0.0579	4.40	*
TEMPERATURA	2	17.3040	8.6520	657.49	**
INTERAÇÕES	4	0.0774	0.0193	1.47	NS
ERRO	18	0.2369	0.0132		

NS - NAO SIGNIFICATIVO

\* - SIGNIFICATIVO AO NIVEL DE 95%

\*\* - SIGNIFICATIVO AO NIVEL DE 99%



A5- CONSUMO DE ENERGIA EM ESTUFA PILOTO - Intervalo de unidade de verde ate 10%.

C.V.	G.L	S.Q	Q.M	F	
TOTAL	26	51548.8000			
TRATAMENTO	8	38392.8000	4799.0800	6.57	**
VELOC. DO AR	2	2065.5000	1032.7500	1.41	NS
TEMPERATURA	2	35732.6000	17866.3000	24.44	**
INTERAÇÕES	4	594.5000	148.6250	0.20	NS
ERRO	18	13156.1000	730.8960		

NS - NAO SIGNIFICATIVO

\*\* - SIGNIFICATIVO AO NIVEL DE 99%

A6- CONSUMO DE ENERGIA EM ESTUFA PILOTO - Intervalo de unidade de verde ate 30%.

C.V.	G.L	S.Q	Q.M	F	
TOTAL	26	10681.1000			
TRATAMENTO	8	5348.3800	668.5470	2.26	NS
VELOC. DO AR	2	1071.1300	535.5630	1.81	NS
TEMPERATURA	2	3914.1300	1957.0600	6.61	**
INTERAÇÕES	4	363.1250	90.7813	0.31	NS
ERRO	18	5332.9400	296.2740		

NS - NAO SIGNIFICATIVO

\*\* - SIGNIFICATIVO AO NIVEL DE 99%

A7- CONSUMO DE ENERGIA EM ESTUFA PILOTO - Intervalo de umidade de 30% ate 10%

C.V.	G.L	S.Q	Q.M	F	
TOTAL	26	24682.9000			
TRATAMENTO	8	19807.0000	2475.8700	9.14	**
VELOC. DO AR	2	273.2730	136.6370	0.50	NS
TEMPERATURA	2	19121.8000	9560.9100	35.30	**
INTERAÇÕES	4	411.8590	102.9650	0.38	NS
ERRO	18	4875.9200	270.8850		

NS - NAO SIGNIFICATIVO

\*\* - SIGNIFICATIVO AO NIVEL DE 99%